



**André Loureiro
Vieira de Castro**

**Adaptação da máquina SPIF-A para realização de
soldaduras por atrito com ferramenta**



**André Loureiro
Vieira de Castro**

**Adaptação da máquina SPIF-A para realização de
soldaduras por atrito com ferramenta**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e do Professor Doutor Ricardo José Alves de Sousa, Professor Auxiliar de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, ao meu irmão e à minha namorada pelo incansável apoio.

O Júri

Presidente

Prof. Doutor Robertt Angelo Fontes Valente
Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Francisco José Gomes da Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Prof. António Manuel de Bastos Pereira
Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Neste espaço manifesto os meus sinceros agradecimentos a todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira e ao Professor Doutor Ricardo José Alves de Sousa, pelo apoio, interesse, e disponibilidade ao longo de todo o trabalho desenvolvido.

Agradecer também à minha família e namorada pelo apoio, constante motivação e compreensão ao longo de todo o meu percurso académico.

Palavras-chave

Soldadura por atrito, SPIF-A, Parâmetros do processo, Geometria da ferramenta.

Resumo

A investigação desenvolvida neste trabalho teve como objetivo a adaptação de uma máquina de estampagem incremental, para que fosse possível fazer soldadura por atrito em chapas de liga de alumínio 6082 – T651 com uma espessura de 6 mm.

Para este trabalho, foi usada a máquina de estampagem incremental (SPIF-A), presente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Visto que a máquina SPIF-A não foi projetada para soldadura por atrito, esta teve de ser ajustada para que fosse possível fazer as soldaduras.

Foi feito um guião de funcionamento da SPIF-A, visto que a interface entre computador e utilizador não é simples, e um outro de como se pode obter os ficheiros que contêm o programa pretendido.

Foi produzida uma mesa de fixação para se conseguir que as chapas a serem soldadas não se mexam durante os ensaios.

O movimento de rotação da árvore da máquina foi efectuado por um motor hidráulico Danfoss de 80 cm³ de cilindrada e um binário de 195 N.m.

Foram também produzidas ferramentas próprias e de geometria variável, para a realização futura de uma maior variedade de soldaduras, visto que o Departamento possuía apenas uma ferramenta de base plana e outra convexa.

No total foram produzidas 17 ferramentas através de processos de torneamento a partir de um varão de aço H13 obtido da empresa F. Ramada. Têm várias geometrias de pino e as bases variam entre planas e convexas.

Apesar de a obtenção de soldaduras de grande qualidade não ser o principal objetivo desta dissertação, foram realizados alguns ensaios, com a finalidade de verificar a viabilidade do processo.

Foram feitos ensaios em chapas simples, sem junta, para se verificar a viabilidade do motor instalado.

Realizou-se, por fim, um ensaio de tração para verificar a resistência mecânica da soldadura.

Keywords

Friction stir welding, SPIF-A, Process parameters, Tool geometry

Abstract

The research developed in this study had the aim to adapt the Incremental Stamping Machine to make friction stir welding in aluminum alloy sheet 6082 - T651 with a thickness of 6 mm.

For this it was used the incremental stamping machine present in the Mechanical Engineering Department at the Aveiro University as known as Single Point Incremental Forming (SPIF-A). The SPIF-A wasn't design for friction stir welding so we have to adapt it for being possible for us to make the welds.

A document about how to operate the SPIF-A was made because the interface between computer and user isn't simple. It was made a document explaining how we can get the files that contain the desired program.

It was produced a fixing table with the aim to fix the sheets that will be welding. It was used a Danfoss Hydraulic motor with 80 cm³ engine capacity and a torque of 195 N.m.

It was produced proper tools with a variable geometry for the future welding because the department only had one convex base tool and one plan base tool.

It was produced by F. Ramada company a total of 17 tools by lathering process by a H13 steel work piece. The tools got different geometries pins and the bases varies between plan and convex.

Despite of getting high quality welds not being the aim of this study it was made some experiments to verify the viability of the process.

It was made experiments in some virgin sheets with the aim to verify the viability of the new motor.

In the end it was made a tensile test to check the mechanical resistance of the weld.

Índice

Capítulo 1- Introdução	1
1.1 Soldadura por fricção rotacional.....	1
1.2 Soldadura por fricção radial	2
1.3 Soldadura por fricção linear (SFL)	2
1.4 Soldadura por fricção com ferramenta ou <i>friction stir welding</i> (FSW)	3
Capítulo 2- Estado da Arte	5
2.1 História e desenvolvimento da tecnologia.....	5
2.2 Descrição do processo.....	6
2.3 Parâmetros do Processo.....	7
2.3.1 Geometria da ferramenta	8
2.3.2 Pressão axial	13
2.3.3 Velocidade de rotação.....	14
2.3.4 Velocidade de avanço	14
2.3.5 Ângulo de ataque da base da ferramenta.....	15
2.3.6 Sentido de rotação da ferramenta.....	15
2.3.7 Material da ferramenta	15
2.3.8 Material de base.....	16
2.4 Efeitos do Processo	16
2.4.1 Temperatura.....	16
2.4.2 Microestrutura e Propriedades Mecânicas.....	17
2.5 Defeitos da soldadura	19
Capítulo 3- Materiais e Equipamentos.....	21
3.1 Liga Alumínio 6082-T651.....	21
3.2 Máquina SPIF-A	22
3.3 Tacómetro digital	25
3.4 Máquina de tração Shimadzu de 10kN modelo AGS-X STD +250	25
Capítulo 4- Trabalho Experimental e Resultados Obtidos	27
4.1 Produção de uma mesa de fixação	27
4.2 Obter e maquinar provetes.....	28
4.3 Saber operar a SPIF-A e criar guias de funcionamento	28
4.4 Realização de um ensaio preliminar	28
4.5 Projetar as ferramentas	31

4.6 Tratamento térmico das ferramentas	34
4.7 Adaptação da SPIF-A. Adquirir e maquinar novas peças para fixar o novo motor Danfoss de 80 cm ³	35
4.8 Fixar o novo motor.....	37
4.9 Realizar ensaios em chapas simples, sem junta, e verificar resultados.....	39
Ensaio com a ferramenta número 6.....	39
Ensaio com a ferramenta número 14.....	41
4.10 Realização de soldaduras topo-a-topo com mesa invertida.....	42
Ensaio com ferramenta número 1.....	43
4.11 Realização de um ensaio de tração.....	49
Capítulo 5- Conclusões, discussão dos resultados obtidos e trabalho futuro.....	53
Bibliografia.....	55
Anexos.....	59
Anexo A - Desenho da base da mesa de fixação	60
Anexo B – Desenho das peças de aperto da mesa de fixação	61
Anexo C – Guião de Manual de utilização da SPIF-A.....	62
Anexo D – Guião de Manual de criação de ficheiros .mat	80
Anexo E – Desenhos técnicos das ferramentas	90
Anexo F – Ficha técnica do motor Danfoss de 20cm ³	107
Anexo G – Ficha técnica do aço AISI H13	108
Anexo H – Ficha do tratamento térmico das ferramentas.....	109
Anexo I - Ficha técnica do motor Danfoss de 80cm ³	111
Anexo J - Desenho do apoio do motor.....	112
Anexo K - Desenho do provete para tração	113

Índice de Figuras

Figura 1 - Soldadura por fricção rotacional: a) inércia; b) contínua.....	2
Figura 2 – Soldadura por fricção radial	2
Figura 3 – Processo de soldadura por fricção linear (SFL): a) posicionamento inicial; b) movimentação da peça; c) aumento da temperatura local; d), e), f) ocorrência da soldadura	3
Figura 4- Soldadura por <i>friction stir welding</i> (FSW)	4
Figura 5 - Deformação plástica após aquecimento do material	5
Figura 6 - Aplicação do processo de FSW na indústria.....	6
Figura 7 - Esquema do processo de FSW	7
Figura 8 - Parâmetros do processo de FSW	8
Figura 9 - Tipos de Ferramentas: a) Ferramenta fixa; b) Ferramenta ajustável; c) Ferramenta de Base dupla	8
Figura 10 - Ferramenta de base dupla	9
Figura 11 - Geometrias típicas das bases das ferramentas para FSW	12
Figura 12 - Geometrias típicas dos pinos das ferramentas de FSW	13
Figura 13 - Representação da pressão axial, velocidade de rotação e de avanço	14
Figura 14 - Representação do ângulo de ataque	15
Figura 15 – Microestrutura típica resultante do processo de soldadura FSW.....	17
Figura 16 – Diferenciação microestrutural das zonas <i>nugget</i> e ZATM	18
Figura 17 - Distribuição de temperatura na vizinhança da soldadura	19
Figura 18 - Exemplos de alguns defeitos de soldadura FSW.....	20
Figura 19 - Exemplo de um <i>kissing bond</i>	20
Figura 20 – Cara humana de grande complexidade feita na SPIF-A	22
Figura 21 - Processo de estampagem incremental	23
Figura 22 - Exemplo de Estampagem incremental.....	23
Figura 23 - Máquina SPIF-A presente no DEM	24
Figura 24 – Principais constituintes da SPIF-A	24
Figura 25 - Tacómetro digital utilizado durante os ensaios	25
Figura 26 - Máquina de tração Shimadzu de 10 kN modelo AGS-X STD +250	25
Figura 27 - Render da mesa de fixação e mesa de fixação produzida	27
Figura 28 - Esquema de montagem para realização de ensaios.....	28
Figura 29 - Aspeto dos provetes no final do ensaio preliminar	29
Figura 30 - Representação da deslocação do pino.....	30
Figura 31 - Aspeto físico das ferramentas antes e após o tratamento térmico.....	34
Figura 32 - Veio de transmissão montado na peça inferior do acoplador flexível	35
Figura 33 - Modelação simplificada em Catia V5 da árvore da máquina.....	36
Figura 34- Esquema de transmissão de movimento do motor para a ferramenta	36
Figura 35 - Colunas, veio de transmissão e parte inferior do acoplador flexível montados na SPIF-A	37
Figura 36 - Modelo em Catia e produto final do apoio do motor.....	37
Figura 37 - Dimensões do veio do motor	38
Figura 38 - Esquema para maquinação da parte superior do acoplador flexível	38
Figura 39 - Motor montado na árvore da SPIF-A	39
Figura 40 - Parte superior do provete após ensaio com ferramenta número 6	40

Figura 41 - Parte inferior do provete após ensaio com ferramenta número 6.....	40
Figura 42 - Local onde se conseguiu unir o material.....	40
Figura 43 - Parte superior do provete após ensaio com ferramenta número 14	41
Figura 44 - Parte inferior do provete após ensaio com ferramenta número 14.....	41
Figura 45 - Mesa de fixação invertida	42
Figura 46 - Aspeto do provete após ensaio com a ferramenta número 1	43
Figura 47 - Ensaio segundo o eixo negativo de X na linha de junta e segundo o eixo positivo de X na lateral do provete.....	44
Figura 48 - Provete dos ensaios 3 e 4 seccionado.....	44
Figura 49 - Provete dos ensaios 5,6,7,8,9 e 10.....	45
Figura 50 - Provete dos ensaios 6,8 e 10 seccionado.....	45
Figura 51 - Parte superior do provete soldado de ambos os lados	46
Figura 52 - Parte inferior do provete soldado de ambos os lados	47
Figura 53 – Defeito quando a base da ferramenta FSW não entra em contacto com chapa – secção 1	47
Figura 54 - Material unido - secção 2.....	48
Figura 55 - Material unido e linha de junta - secção 3	48
Figura 56 - Aspeto do provete fazendo variar a velocidade de avanço	49
Figura 57 - Provete de tração obtido após maquinação das chapas soldadas	49
Figura 58 - Centro de maquinação CNC presente no DEM	50
Figura 59 - Gráfico Tensão Real vs Deformação Real.....	51
Figura 60 - Provete de tração após ensaio de tração.....	51

Índice de Tabelas

Tabela I - Ferramentas-padrão patenteadas pelo <i>The Welding Institute</i>	11
Tabela II - Composição química das ligas de Al 6082-T651.....	21
Tabela III - Propriedades mecânicas e físicas das ligas de Al 6082-T651	21
Tabela IV - Lista de ferramentas produzidas.....	32
Tabela V - Propriedades mecânicas da liga 6082 tratada e não tratada termicamente.....	50
Tabela VI - Resultados do ensaio de tração	51

Capítulo 1- Introdução

A soldadura por fricção é um processo relativamente recente sendo as primeiras ligações obtidas nos anos 90 do século passado. Existem muitas variantes deste tipo de soldadura, das quais se realçam as soldaduras por fricção rotacional contínua ou por inércia, soldadura por fricção radial, soldadura por fricção linear (SFL) e a soldadura por fricção com ferramenta, também conhecida por, *Friction Stir Welding* (FSW), constituindo, esta última, o objeto de estudo desta dissertação.

Estes métodos realizam soldaduras no estado sólido e permitem a união de materiais tanto metálicos como polímeros ou compósitos e tem enorme potencial em aplicações da indústria naval, aeronáutica, aeroespacial, transporte terrestre e construção metálica [1].

A soldadura por fricção é utilizada para soldar peças com geometrias não-axissimétricas. E é usada, por exemplo, na Boeing para a soldadura dos tanques de combustível dos foguetões do programa DeltaIV [2].

O presente trabalho, surge da inexistência de uma máquina específica para soldadura por fricção no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. O objetivo é reajustar a máquina Single Point Incremental Forming (SPIF) [3] para que se possa fazer tanto estampagem incremental como soldadura por fricção.

1.1 Soldadura por fricção rotacional

Neste tipo de soldadura, uma das peças a soldar encontra-se fixa, enquanto a outra é provida de rotação. Os componentes a unir têm um formato normalmente cilíndrico. Quando se atinge a velocidade de rotação desejada, dá-se início ao contacto entre as peças a soldar. Ao entrarem em contacto, o atrito existente faz com que a energia cinética se converta em energia térmica [4].

A principal diferença entre a Soldadura por fricção rotacional por inércia e a contínua é que na primeira, é utilizado um volante de inércia para armazenar a energia cinética.

Na zona de contacto entre a peça fixa e a provida de rotação, ocorre a deformação plástica do material, que flui para o exterior da junta devido à força aplicada (Figura 1.a 1.b).

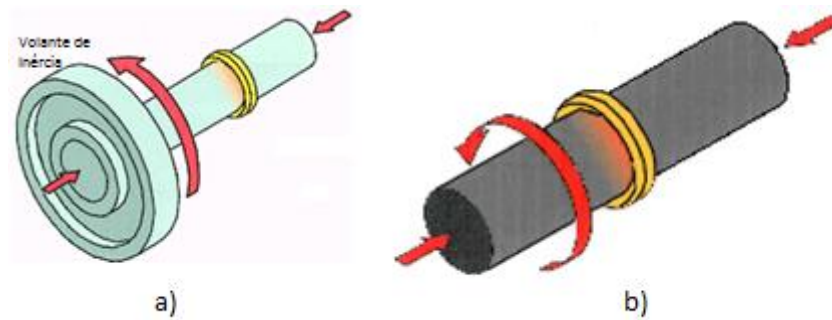


Figura 1 - Soldadura por fricção rotacional: a) inércia; b) contínua

Fonte: Adaptado de [5]

1.2 soldadura por fricção radial

A soldadura por fricção radial envolve a rotação e compressão radial de um anel com uma abertura em “V” como demonstrado na figura 2. As peças a soldar encontram-se fixas e é colocado um mandril para que o processo de soldadura seja facilitado [6].

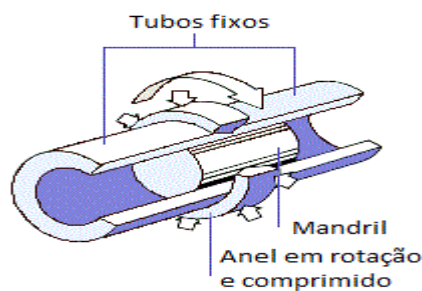


Figura 2 – Soldadura por fricção radial

Fonte: Adaptado de [6]

1.3 Soldadura por fricção linear (SFL)

O princípio de funcionamento presente na soldadura por fricção linear (SFL), também conhecida por soldadura por atrito linear, faz com que uma peça oscile, com uma grande frequência, enquanto a outra permanece fixa (Figura 3.a 3.b). É então sujeita a uma força perpendicular ao seu plano de translação e as peças entram em contacto (Figura 3.c). Há um aumento de temperatura local e ocorre a soldadura (Figura 3.d 3.e 3.f). No final do processo é necessário realizar operações de maquinação para remover o material em excesso presente na peça [7].

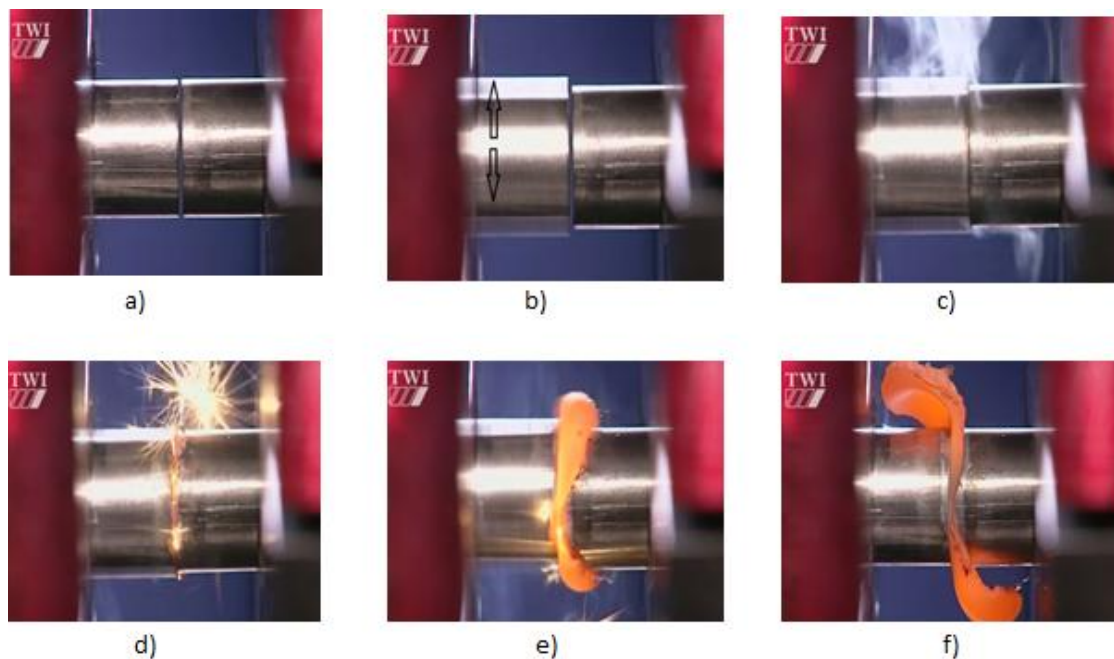


Figura 3 – Processo de soldadura por fricção linear (SFL): a) posicionamento inicial; b) movimentação da peça; c) aumento da temperatura local; d), e), f) ocorrência da soldadura

Fonte: Adaptado de [8]

1.4 Soldadura por fricção com ferramenta ou *friction stir welding* (FSW)

Sendo este o método a ser estudado nesta dissertação, será descrito com maior pormenor. A soldadura *friction stir welding* (FSW) é um processo de soldadura, inicialmente desenvolvido para realizar soldaduras em alumínio. No entanto, ao longo dos últimos anos tem vindo a ser utilizado com ligas de titânio e de níquel [9].

As vantagens apontadas a este tipo de soldadura, quando comparado com os métodos de soldadura convencionais por fusão são: processo sem fumos/radiações nocivas para o ambiente ou soldador (soldadura considerada amiga do ambiente); não ocasiona porosidade ou fissuração na solidificação; boas propriedades mecânicas das soldaduras; baixa distorção e tensões residuais pouco significativas; energeticamente eficiente; não necessita de material de adição nem de mão-de-obra especializada [1] [10].

No entanto, existem também algumas limitações das quais se destacam a dificuldade em executar soldaduras de geometria complexa, a necessidade de fixação rígida dos elementos a soldar, presença de um orifício no final da soldadura e a dificuldade associada à produção de soldaduras e ferramentas para materiais dissimilares [1].

Este processo consiste em colocar uma ferramenta, constituída por um pino a rodar sobre as peças a unir, esta ferramenta avança linearmente sobre a linha de junta dos dois materiais (Figura 4). As soldaduras são criadas pela ação combinada de aquecimento por fricção e a deformação

mecânica, provocada pela ferramenta em rotação. Durante o processo o material é sujeito a elevada deformação plástica que promove uma subida local de temperatura, da qual resulta a junção das peças a unir. O processo é integralmente conduzido no estado sólido, porque a dissipação de calor mantém as temperaturas abaixo da temperatura de fusão do material. A temperatura máxima atingida é da ordem de 80% da temperatura de fusão [11] [12].

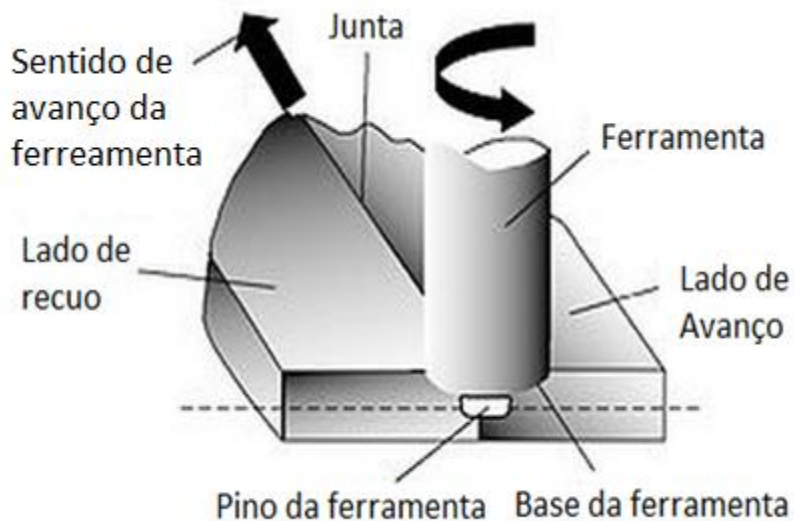


Figura 4- Soldadura por *friction stir welding* (FSW)

Fonte: Adaptado de [13]

O fluxo de material é fortemente influenciado pela rotação, sentido e geometria da ferramenta, velocidade de avanço, força axial e ângulo de ataque da ferramenta e tempo de estabilização (tempo necessário para se obter o material no estado pastoso) [14].

Capítulo 2- Estado da Arte

2.1 História e desenvolvimento da tecnologia

A soldadura de materiais metálicos é um método de ligação muito anterior ao século XXI. O desenvolvimento de novas tecnologias dedicadas a processos de ligação dura até aos dias de hoje. Até ao século XIX, as técnicas de soldadura já existiam mas implicavam a utilização de meios tecnológicos extremamente rudimentares [2].

Os pioneiros na utilização deste processo de ligação, foram os ferreiros, que não utilizavam mais do que uma fonte de calor, normalmente uma fogueira, para aquecer ou fundir os materiais, e um martelo, para conseguirem deformar plasticamente o material na zona da ligação (Figura 5) [2].



Figura 5 - Deformação plástica após aquecimento do material

Fonte: Adaptado de [2]

A Soldadura por Fricção, a Soldadura por Pressão a Frio, a Soldadura por ultrassons e a Soldadura por Explosão, são exemplos de algumas das variantes mais sofisticadas das tecnologias de soldadura em fase sólida, atualmente disponíveis no mercado [1].

Materiais como o alumínio podem ser facilmente soldados sem serem fundidos, com recurso ao processo de FSW. FSW é um processo de ligação no estado sólido desenvolvido pelo *The Welding Institute* (TWI), em 1991, em Cambridge, na Inglaterra e tem atraído um considerável interesse [15].

Devido aos resultados animadores, em pouco tempo recebeu grandes investimentos para que se fizesse um aprofundamento dos estudos das técnicas de soldadura. Hoje em dia possui diversas aplicações em várias indústrias do mercado. Com o constante avanço da robótica e da automatização, a operação das máquinas é bastante simples, o que resulta numa facilitação de operação e exigindo do soldador cada vez menos capacidade manual (Figura 6).

A introdução da força de atrito ou fricção nos processos de soldadura é bastante recente apesar da força de atrito já ser conhecida de tempos bastante antigos pela humanidade.

Segundo a *American Welding Society* (AWS), os processos de soldadura por atrito deram o primeiro passo no ano de 1891, quando foram patenteados nos Estados Unidos. Posteriormente, foram patenteados ao redor da Europa, entre os anos 1920-1944, e na União Soviética em 1956. Na década de 60, houve um grande avanço devido ao interesse de diversas empresas americanas em desenvolver esta técnica. Exemplos dessas empresas são a *AMF* que produziu máquinas para soldar fusos sem-fim, a *Caterpillar* que investiu em máquinas para soldar turbocompressores e cilindros hidráulicos e a *Rockwell International* que construiu máquinas para soldar eixos de caixas de engrenagem para caminhões [16].

A FSW pode ser usada para unir vários tipos de materiais como por exemplo: alumínio e suas ligas [17], cobre e suas ligas [17], chumbo [17], titânio e suas ligas [17], zinco [17] e aço macio [17].



Figura 6 - Aplicação do processo de FSW na indústria

Fonte: Adaptado de [18]

2.2 Descrição do processo

Como a própria designação indica, a fonte de energia utilizada para gerar o calor, necessário ao desenvolvimento do processo é a fricção entre as peças a unir e a ferramenta, que se desloca linearmente ao longo da linha de soldadura.

Na FSW, a ferramenta é animada de movimento de rotação (Figura 7.1). Em seguida, a ferramenta é pressionada através de uma força de compressão axial na direção das peças e penetra lentamente na área de união entre duas peças ou chapas encostadas topo-a-topo (Figura 7.2). As peças devem estar fixadas de tal forma que se evite a sua separação ou oscilação [11] [12].

A penetração deve ocorrer até que a base da ferramenta (Figura 9.a) entre em contacto com a parte superior das peças. O comprimento do pino da ferramenta deve ser ligeiramente inferior à espessura das peças a soldar.

A energia calorífica resultante da fricção conduz ao amaciamento dos materiais a ligar, sem provocar a sua fusão (Figura 7.3), sofrendo deformação plástica intensa sob a ação da ferramenta rotativa que se desloca transversalmente ao longo da linha de soldadura [19].

Durante o movimento da ferramenta, os materiais presentes nas duas faces da junta, e localizados à frente da ferramenta, sofrem deformação plástica intensa, que provoca um aquecimento e consequente amaciamento, sendo depois arrastados para a parte de trás da ferramenta, onde, após o arrefecimento, surge a soldadura. De modo a obter uma ligação contínua, a ferramenta desloca-se linearmente ao longo da junta (Figura 7.4) [11] [12].

A soldadura FSW pode ser usada para a união de folhas e chapas de alumínio sem material de adição ou gás de proteção. Podem-se soldar espessuras desde 1.2 a 50 mm com penetração total, sem porosidades ou defeitos internos e obter juntas soldadas de alta integridade e baixa deformação em várias ligas de alumínio, mesmo naquelas consideradas de difícil soldabilidade [17].

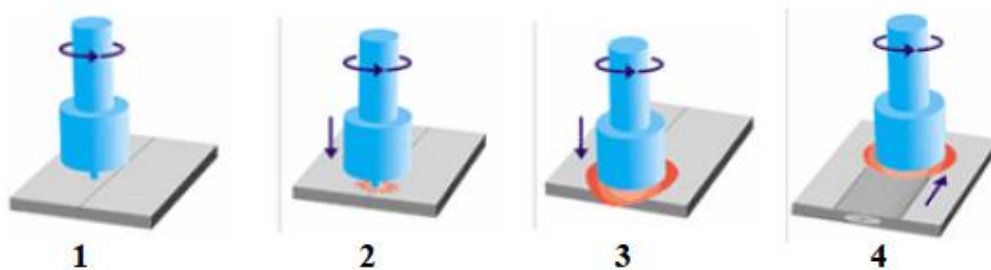


Figura 7 - Esquema do processo de FSW

Fonte: Adaptado de [1]

Um dos objetivos do FSW é a obtenção de juntas soldadas com boas propriedades mecânicas e sem defeitos, evitando assim falhas estruturais graves em aplicações industriais.

2.3 Parâmetros do Processo

Só através da combinação ideal dos parâmetros de soldadura (Figura 8) é possível obter uma boa qualidade da junta. Qualquer combinação inadequada dos parâmetros do processo pode resultar em soldaduras incompletas, formação de defeitos ou falhas de soldadura. Os principais parâmetros e variáveis a ter em conta no processo de soldadura são [19] [20]:

1. Geometria da ferramenta;
2. Pressão axial;
3. Velocidade de rotação;
4. Velocidade de avanço linear;
5. Ângulo de ataque da base da ferramenta;
6. Sentido de rotação da ferramenta;
7. Material da ferramenta;
8. Material de base;

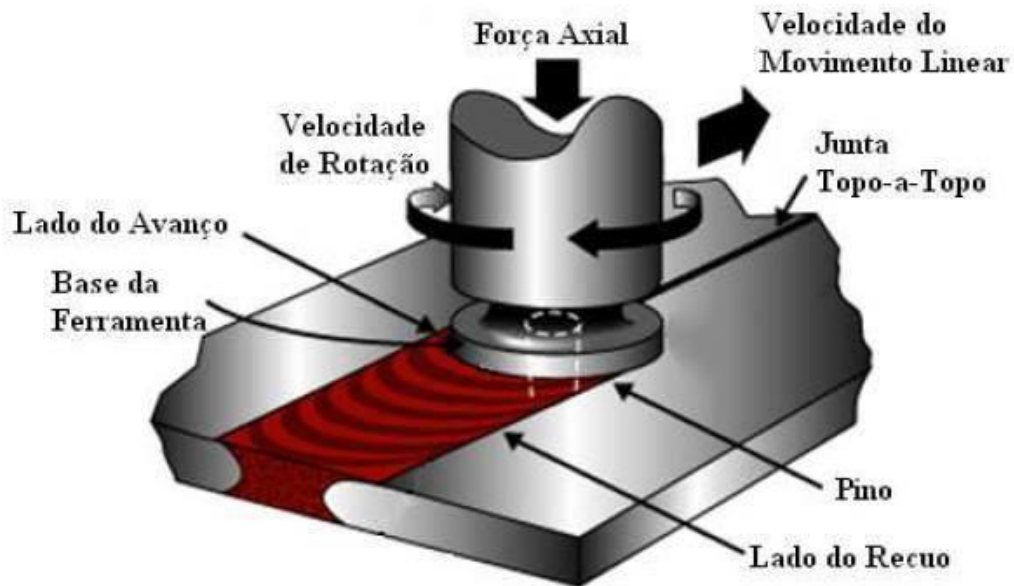


Figura 8 - Parâmetros do processo de FSW

Fonte: Adaptado de [21]

2.3.1 Geometria da ferramenta

A geometria da ferramenta é um parâmetro muito importante neste processo pois influencia o modo como ocorre a deformação plástica na soldadura. Atualmente existe uma grande variedade de ferramentas e estas podem ser agrupadas em 3 tipos (Figura 9):

1. Ferramenta fixa (*Fixed*) (Figura 9.a) [22] [23];
2. Ferramenta ajustável (*Adjustable*) (Figura 9.b) [24] [25];
3. Ferramenta de base dupla (*Self-reacting* ou *bobbin type*) (Figura 9.c) [24] [26];

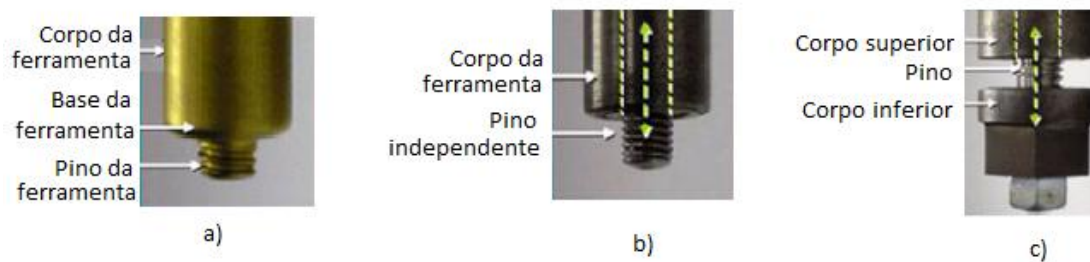


Figura 9 - Tipos de Ferramentas: a) Ferramenta fixa; b) Ferramenta ajustável; c) Ferramenta de Base dupla

Fonte: Adaptado de [24]

A ferramenta fixa corresponde a uma peça única. Pode-se dizer que o pino, base e corpo da ferramenta são todos a mesma peça. Só pode soldar peças com espessura constante, pois o comprimento do pino é fixo. No caso de o pino se danificar toda a ferramenta tem de ser substituída.

A ferramenta ajustável consiste em duas peças independentes. O corpo e o pino são separados para permitir o ajuste do comprimento do pino. O pino e o corpo podem ser feitos de materiais diferentes e em caso de se desgastar ou danificar o pino, este pode ser facilmente substituído. Além disso, o comprimento do pino ao ser ajustável pode permitir a soldadura de peças com uma maior variedade de espessuras.

A ferramenta de base dupla é composta por três partes: corpo superior, pino e corpo inferior. Esta ferramenta pode trabalhar várias espessuras devido ao comprimento ajustável do pino entre a parte superior e inferior das peças a soldar. Para se iniciar o processo de soldadura usando uma ferramenta de base dupla, é necessário furar as chapas na zona da junta. Em seguida o pino da ferramenta é colocado no furo, sem o corpo inferior, de modo a que a base superior fique em contacto com peça. Após esta operação, o corpo inferior é ligado ao pino e coloca-se a base inferior em contacto com a chapa a soldar (Figura 10).

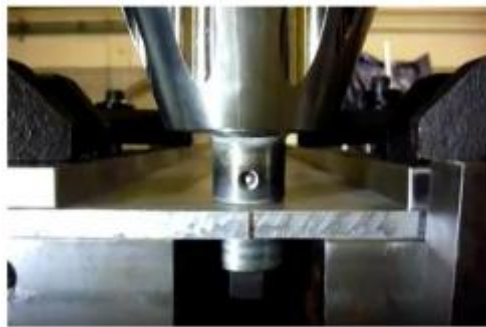


Figura 10 - Ferramenta de base dupla

Fonte: Adaptado de [27]

De realçar ainda que a ferramenta de base dupla trabalha perpendicularmente ao plano de trabalho, ao contrário das ferramentas fixa e ajustável que permitem variar o ângulo de ataque.

Como se trata de um trabalho pioneiro, pois as soldaduras serão realizadas na máquina SPIF-A, as ferramentas produzidas são ferramentas fixas, visto que são as mais simples de produzir. Naturalmente, a espessura das chapas a soldar será constante.

As ferramentas fixas podem ser divididas em 3 partes principais (Figura 9a):

1. Corpo da ferramenta: Tem a função de fixar a ferramenta à máquina de FSW, promover a dissipação do calor promovido pelo atrito entre as chapas a soldar e a parte ativa (base e pino) da ferramenta.
2. Base da ferramenta: Tem a função de manter o material em deformação plástica abaixo da base, facilitando o fluxo de material na soldadura. O atrito criado entre a base da ferramenta e os elementos a ligar gera calor necessário para facilitar a sua mistura por deformação plástica na zona da junta de soldadura.
3. Pino: É a zona crítica da ferramenta. Através dos movimentos de rotação e de translação promove a deformação plástica e a homogeneização do material das chapas a soldar.

A ferramenta apresenta três funções principais, que são:

1. Aquecimento dos materiais a unir;
2. Movimentação do material já em estado plástico, para que se misturem e assim produzam a junta;
3. Manter o metal aquecido abaixo da base da ferramenta.

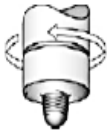





É importante a otimização da geometria da ferramenta para que se possa produzir mais calor e assim tornar mais eficiente a ação do pino. Como a base e o pino se encontram em contacto direto com o material a soldar, são chamados como a parte ativa da ferramenta. Assim sendo, são consideradas as partes mais importantes da ferramenta de FSW.

A forma como o corpo da ferramenta resiste aos esforços mecânicos aplicados e dissipa o calor também assume particular importância no decorrer do processo. O corpo da ferramenta pode apresentar alhetas que permitem aumentar a dissipação de calor e deste modo prolongar a vida útil da ferramenta [19].

A tabela I apresenta ferramentas-padrão patenteadas pelo *The Welding Institute (TWI)*. As diferenças no tamanho, forma e geometria são adequadas para uma aplicação específica, considerando o material e tipo de junta.

Tabela I - Ferramentas-padrão patenteadas pelo *The Welding Institute*

Fonte: Adaptado de [24]

Ferramenta	Cilíndrica	<i>Whorl</i> TM	<i>MX triflute</i> TM	<i>Flaredtriflute</i> TM	<i>A-skew</i> TM	<i>Re-stir</i> TM
Esquema						
Forma do Pino	Cilíndrico roscado	Cônico roscado	Roscado cônico com 3 estrias	Tri-estriado com estrias alargadas para fora	Cilíndrico inclinado roscado	Cônico roscado
Rotação invertida	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Aplicação	Soldadura topo-a-topo. Falha em soldadura sobreposta	Soldadura topo-a-topo	Soldadura topo-a-topo	Soldadura sobreposta com menor desbaste da placa superior	Soldadura sobreposta a com menor desbaste da placa superior	Quando é desejada a mínima assimetria nas propriedades da soldadura

Como se pode verificar na tabela I, existem vários tipos de ferramentas onde a maior diferença entre elas assenta nos pinos. As alterações de geometria do pino têm grande influência no fluxo de material, microestrutura e na qualidade e propriedades da soldadura [24].

2.3.1.1 Geometrias de Bases

A figura 11 apresenta configurações típicas das geometrias das bases das ferramentas de FSW.

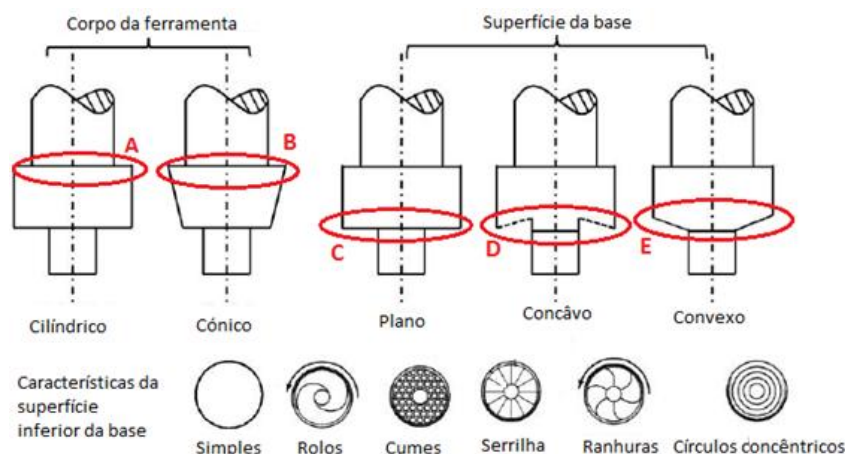


Figura 11 - Geometrias típicas das bases das ferramentas para FSW

Fonte: Adaptado de [24]

A configuração mais comum e mais usada para o corpo da ferramenta é a cilíndrica (Figura 11.A), mas ocasionalmente, os corpos cônicos também são utilizados (Figura 11.B) [28].

Esta geometria não influencia praticamente nada a soldadura pois não entra em contacto com o material de base.

No que toca à configuração da base são utilizadas geometrias plana (Figura 11.C), côncava (Figura 11.D) e convexa (Figura 11.E). Destas três, a geometria plana é a mais simples de produzir.

Ao contrário da base côncava e da base plana, a base convexa deixa o fluxo de material sair de baixo da base da ferramenta.

A incapacidade de as bases evitarem a fuga do material, é um ponto crítico, pois quando o material se escapa da zona de soldadura, pode originar uma soldadura com defeitos e não fiável.

As bases das ferramentas também podem conter algumas geometrias específicas para aumentar a fricção e consequentemente a deformação das peças a soldar [29] [30].

As geometrias típicas estão também presentes na figura 11 sendo elas rolos (*scrolls*), cumes (*ridges*), serrilha (*Knurling*), ranhuras (*Grooves*) e círculos concêntricos (*concentric circles*). Estas características podem ser aplicadas às bases côncava, plana ou convexa [24].

2.3.1.2 Geometria de Pinos

O pino é também responsável pela produção de calor e consequente deformação do material. É concebido para romper e penetrar as peças a trabalhar e promover o movimento do fluxo de material para trás da ferramenta. A figura 12 mostra a forma de alguns pinos e principais características.

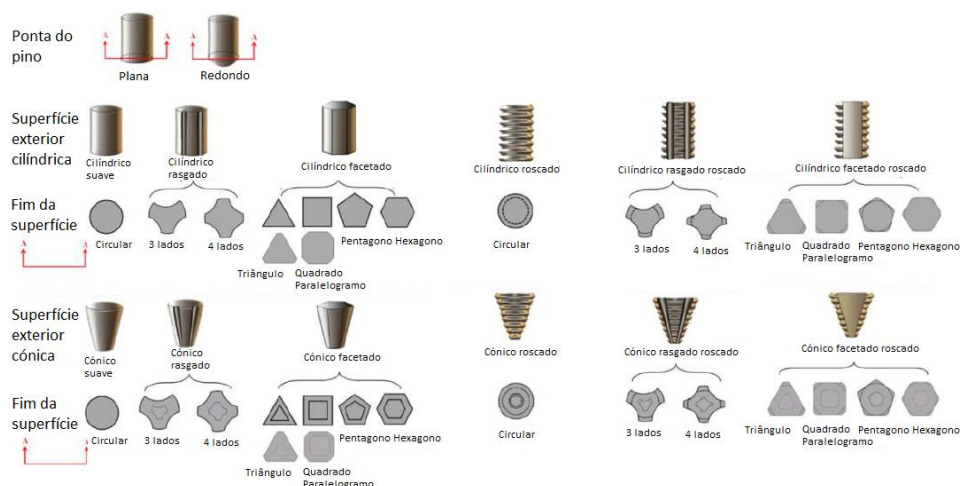


Figura 12 - Geometrias típicas dos pinos das ferramentas de FSW

Fonte: Adaptado de [24]

As extremidades dos pinos têm, normalmente, uma forma plana ou arredondada. A principal desvantagem da extremidade plana é a elevada força durante a penetração. Em contrapartida, uma forma redonda pode reduzir a força e consequente desgaste da ferramenta e aumentar assim a vida útil da mesma.

Devido aos progressos na compreensão do fluxo de material, as geometrias de ferramentas evoluíram significativamente. A forma cilíndrica convencional com pino rosçado tem sido usada para soldar ligas de alumínio até 12 mm de espessura [31].

2.3.2 Pressão axial

No processo de FSW a ferramenta está sujeita a forças axiais e laterais. A pressão axial também pode ser denominada como força vertical de forjamento. É um parâmetro de grande importância pois é preciso garantir o contacto permanente entre a ferramenta e o material em deformação plástica, para se evitar a projeção de material para fora da junta.

A pressão axial aplicada deve permanecer constante ao longo de todo o processo. Devem ser evitadas forças axiais reduzidas pois a base não contacta devidamente com a superfície o que conduz frequentemente ao aparecimento de defeitos de soldadura. A temperatura das soldaduras também aumenta com o aumento da força axial, sendo que se esta for demasiado alta provoca sobreaquecimento e reduz o tempo de vida da ferramenta [32].

2.3.3 Velocidade de rotação

A ferramenta é animada de movimento rotativo antes do pino iniciar a penetração no material a soldar. Este movimento é mantido constante durante todo o processo até à total extração do pino do interior das peças a ligar. Ao aumento da velocidade de rotação da ferramenta está associado o aumento do calor gerado e por consequência aumenta o fluxo plástico do material, facto que pode ser nocivo no que se refere às propriedades mecânicas das soldaduras.

No caso de uma velocidade de rotação muito baixa, o calor gerado é insuficiente e não ocorre o amaciamento do material a soldar [20].

Adamowski e coautores [33] mostraram ser possível a realização de soldadura FSW em ligas de alumínio 6082-T651 com velocidades de rotação entre 230 a 1700 rpm, para velocidades de avanço compreendidas entre 115 e 585 mm/min, respetivamente, tendo obtido os melhores resultados nos valores mais baixos. Rodrigues e coautores [46] num trabalho idêntico indicam que a melhor velocidade é de 500 rpm com avanço de 350 mm/min.

2.3.4 Velocidade de avanço

Ao atingir a temperatura pretendida e estando o material já amaciado, a ferramenta deve iniciar o seu movimento de translação. Uma vez iniciado este movimento, deve manter-se constante ao longo de toda a soldadura (Figura 13).

Assumindo que a velocidade de rotação da ferramenta é constante, uma velocidade de avanço alta conduz a um aumento de produtividade, mas o calor adicionado por unidade de comprimento e o fluxo plástico de material em torno da ferramenta é reduzido. A probabilidade de ocorrerem vazios na soldadura aumenta [32].

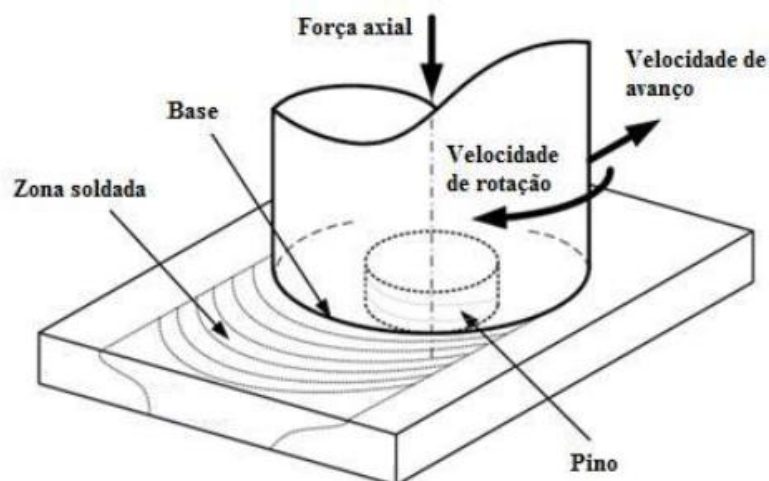


Figura 13 - Representação da pressão axial, velocidade de rotação e de avanço

Fonte: Adaptado de [1]

2.3.5 Ângulo de ataque da base da ferramenta

Para obter melhores resultados, é aconselhado usar uma inclinação de $1-3^\circ$ da ferramenta em relação ao eixo de trabalho da ferramenta. Há um melhor fluxo de material que garante um melhor fecho e bom aspecto visual da superfície superior da soldadura (Figura 14).

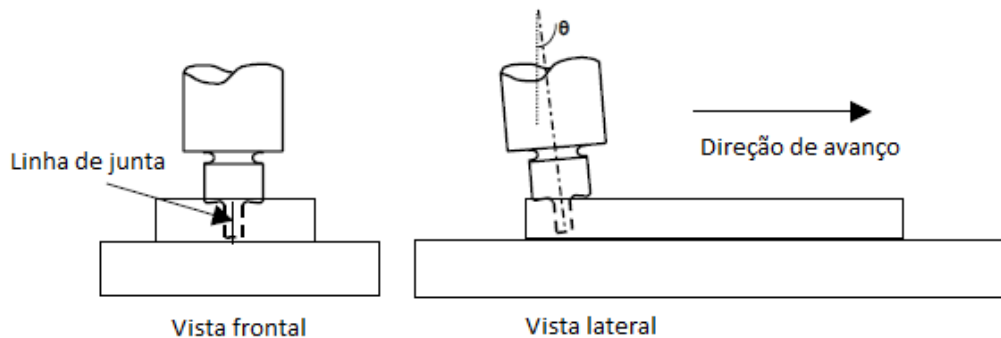


Figura 14 - Representação do ângulo de ataque

Fonte: Adaptado de [34]

2.3.6 Sentido de rotação da ferramenta

É um parâmetro importante no caso de a ferramenta a utilizar possuir rosca, pois caso o sentido de rotação não seja o correto, há a possibilidade de o material ser expulso da zona a soldar e de ocorrer uma fresagem em vez de uma soldadura.

Após a seleção do sentido de rotação e do sentido de avanço da ferramenta, pode-se passar à definição dos lados de avanço e de recuo. O lado da ferramenta de soldadura, onde o movimento da superfície está na mesma direção que a direção transversal, é referido como o lado de avanço. O lado oposto, onde o movimento da superfície se opõe à direção transversal, é referido como o lado de recuo (Figura 8) [11].

2.3.7 Material da ferramenta

O material para ferramentas de FSW é um parâmetro crítico na soldadura. Na seleção do material para a ferramenta, deverá ter-se em atenção a resistência ao desgaste, a resistência à têmpera, a resistência mecânica do material a quente e a elevada tenacidade requerida [47]. O material tem de apresentar dureza relativamente elevada, e tem de manter essa dureza a temperaturas elevadas por um período prolongado. Tem também de ser resistente à oxidação e de possuir baixa condutividade térmica para minimizar as perdas de calor e danos térmicos no equipamento [11].

Rai e coautores [35] indicam vários tipos de materiais utilizados na ferramenta de FSW, tais como aço AISI H13 para soldar ligas de alumínio, pcBn e carbonetos de tungstênio para várias ligas ferrosas e AISI 4140 para materiais dissimilares.

O material para a ferramenta é escolhido tendo em conta o material que se vai trabalhar e o tempo de vida que se pretende para a ferramenta. No caso das ligas de alumínio, são utilizadas ferramentas de aço, sendo o AISI H13 o mais amplamente utilizado.

2.3.8 Material de base

Naturalmente, o material de base não é um parâmetro do processo. É, no entanto, uma variável importante que condiciona todos os parâmetros anteriormente apresentados.

As propriedades mecânicas do material de base, tais como a tensão de cedência, o alongamento e a dureza influenciam o fluxo plástico de material. Diferentes materiais base implicam diferentes ferramentas.

Conforme já referido parâmetros de soldadura como a velocidade de avanço, a velocidade de rotação e a força axial exercida têm grande importância na qualidade da soldadura.

2.4 Efeitos do Processo

2.4.1 Temperatura

A soldadura FSW provoca uma intensa deformação plástica em torno da ferramenta rotativa, e fricção entre a ferramenta e a peça a soldar. Ambos os fatores contribuem para que haja um aumento de temperatura em redor do local de soldadura. Estes gradientes de temperaturas têm influência direta na microestrutura das soldaduras no que toca a tamanho do grão, dissolução de precipitados e propriedades mecânicas das soldaduras [36].

Devido a este conjunto de efeitos secundários, o estudo da distribuição de temperatura, ganha uma importância relevante. No entanto, o estudo da temperatura não será feito nesta dissertação.

Os principais fatores que influenciam a distribuição da temperatura são as velocidades de rotação e de avanço da ferramenta e o coeficiente de atrito existente entre a ferramenta e o material base. A base da ferramenta é a principal responsável pela geração de calor durante a soldadura e a temperatura no interior da zona de soldadura é inferior ao ponto de fusão do material base.

A temperatura máxima durante o processo de soldadura está relacionada com o passo de soldadura (*weldpitch*), que é a razão entre a velocidade de avanço e a velocidade de rotação da ferramenta [37].

O pino também cria um aumento de temperatura, pois este é o primeiro a entrar em contacto com a peça a soldar.

2.4.2 Microestrutura e Propriedades Mecânicas

Após o processo de soldadura FSW verifica-se uma grande diversidade microestrutural, naturalmente heterogenia. Existem regiões comuns às soldaduras convencionais, no entanto, existem também regiões únicas que são características da soldadura FSW [14]. As microestruturas que resultam do processo de FSW são classificadas em 4 regiões (Figura 15):

1. Zona de mistura ou *Nugget*;
2. Zona afetada térmica e mecanicamente (ZATM);
3. Zona afetada termicamente (ZAT);
4. Zona do material base (MB);



Figura 15 – Microestrutura típica resultante do processo de soldadura FSW

Fonte: Adaptado de [14]

A zona *nugget* corresponde à zona que sofreu ação do pino e é a região onde o material é mais fortemente deformado. É na zona *nugget* que é atingida a maior temperatura e assim sendo, ocorre recristalização nesse local. Normalmente, a forma do grão na zona *nugget* é por vezes equiaxial e com tamanho na escala do micron e inferior ao do material de base [38] [39].

A zona afetada térmica e mecanicamente é a zona adjacente à zona *Nugget*, a contar do centro de soldadura. É uma zona característica do processo de soldadura FSW e é também considerada como uma zona de transição. A deformação plástica continua a ser elevada devido à ação da ferramenta mas não é suficiente para que ocorra a recristalização. Desta forma, torna-se fácil fazer a distinção entre a zona *nugget* e a zona afetada térmica e mecanicamente (Figura 16) [36] [40].

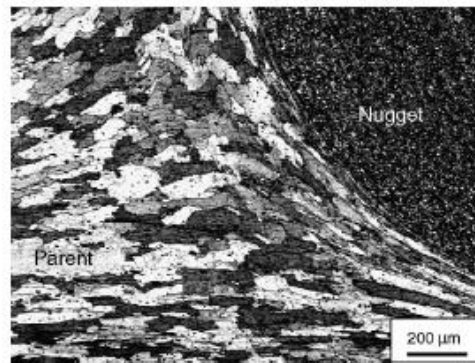


Figura 16 – Diferenciação microestrutural das zonas *nugget* e ZATM

Fonte: Adaptado de [36]

Tanto a deformação plástica como a temperatura atingida na zona afetada térmica e mecanicamente são inferiores à zona *nugget* mas a temperatura é alta o suficiente para que haja dissolução de precipitados.

A Zona afetada termicamente é uma região já conhecida de processos de soldadura convencionais. Na soldadura FSW esta zona aparece a seguir à zona afetada térmica e mecanicamente. Tal como o nome indica, é uma região onde o material é influenciado pelo calor proveniente da soldadura mas onde já não ocorre deformação plástica. A temperatura é inferior à que é atingida na zona afetada térmica e mecanicamente. A estrutura dos grãos é igual à do material de base [36].

Zona do material base é a zona seguinte à zona afetada termicamente, e que está suficientemente afastada do local de soldadura para não ser afetada pelo calor. Assim sendo, propriedades e microestrutura não sofrem quaisquer alterações.

Jonckheere e coautores [41] fizeram um estudo sobre a evolução da temperatura na vizinhança do cordão de soldadura. Verificaram que nas ligas de alumínio 6061 e 2014, para uma velocidade de rotação da ferramenta de 500 rpm, os valores atingidos são da ordem dos 440°C e 330 °C às distâncias de 5 mm e 8 mm do centro do cordão, respetivamente. Os valores da temperatura foram naturalmente mais altos para o caso de 1500 rpm, atingindo aproximadamente 500°C e 300°C às distâncias anteriormente referidas (Figura 17).

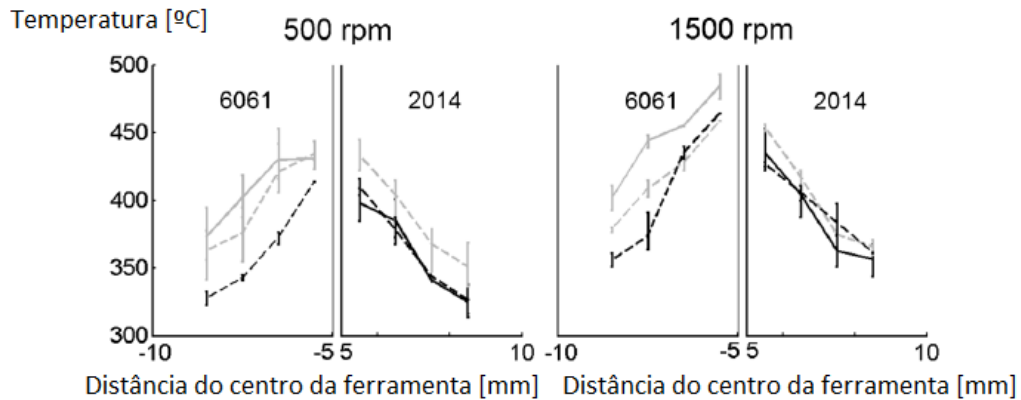


Figura 17 - Distribuição de temperatura na vizinhança da soldadura

Fonte: Adaptado de [41]

2.5 Defeitos da soldadura

Existem sempre potenciais defeitos quaisquer que sejam os tipos de soldadura. A soldadura FSW não é exceção. Os defeitos na soldadura FSW, tal como nos processos de soldadura convencionais, surgem principalmente por parâmetros de processo mal selecionados. Defeitos comuns na soldadura FSW são por exemplo: penetração incompleta, falta de fusão, túneis, vazios, sulcos superficiais e falta de continuidade (*kissing bond*). Alguns desses defeitos estão ilustrados na figura 18 [42].

A ocorrência de penetração incompleta como o nome indica, resulta de uma penetração deficiente da ferramenta. Este fenómeno ocorre devido ao alinhamento imperfeito da ferramenta em relação à junta de soldadura ou a uma geometria da ferramenta inadequada.

A falta de fusão ocorre quando não é atingida uma temperatura suficientemente alta para que se possa dar a soldadura. Este defeito pode acontecer devido a uma má seleção dos parâmetros de soldadura, nomeadamente, velocidade de rotação.

Os vazios, túneis e sulcos superficiais são defeitos volumétricos que podem ou não ser contínuos. Estes defeitos podem ocorrer tanto a alta ou a baixa rotação da ferramenta. As localizações destes defeitos são dependentes do material de base e das condições de soldadura. Os vazios localizam-se normalmente no lado de avanço da soldadura [43].

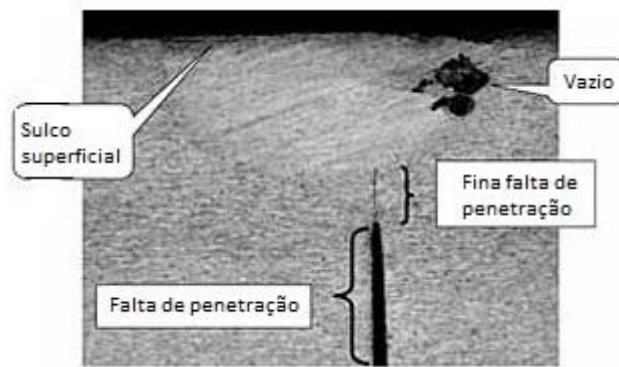


Figura 18 - Exemplos de alguns defeitos de soldadura FSW

Fonte: Adaptado de [36]

A falta de continuidade ou *kissing bond* é um tipo específico de defeito na ligação de estado sólido, em que dois materiais sólidos estão em contacto, mas com pouca ou nenhuma ligação metalúrgica presente (Figura 19). Uma das principais causas para este fenómeno, é a insuficiente penetração da ferramenta para dentro do material da peça de trabalho. Um *kissing bond* pode reduzir significativamente a resistência e vida das soldaduras causando falha prematura.

Este defeito é particularmente preocupante, uma vez que é difícil de detectar com precisão mesmo usando métodos como raios-X ou ultrassons [43].

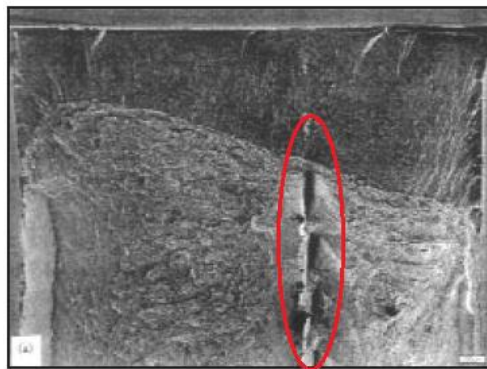


Figura 19 - Exemplo de um *kissing bond*

Fonte: Adaptado de [36]

Capítulo 3- Materiais e Equipamentos

3.1 Liga Alumínio 6082-T651

A liga de alumínio 6082 é uma liga de resistência média e com excelente resistência à corrosão, é a que tem a maior resistência das ligas da serie 6000 e é conhecida como sendo um liga estrutural. É uma liga frequentemente usada para maquinação.

A denominação “T” indica que a liga passou por um tratamento térmico. Mais em detalhe, o “T651” refere-se a um tratamento térmico seguido de um alívio de tensões por aplicação de tração. Esta liga apresenta uma boa soldabilidade, no entanto, a resistência é reduzida na zona soldada [42]. As tabelas II e III apresentam a composição química e as propriedades mecânicas e físicas da liga de alumínio 6082 – T651 respetivamente.

Tabela II - Composição química das ligas de Al 6082-T651

Fonte: Adaptado de [42]

Elemento	Presença [%]
Si	0.7-1.3
Fe	0.0-0.5
Cu	0.0-0.1
Mn	0.4-1.0
Zn	0.6-1.2
Ti	0.0-0.2
Cr	0.0-0.25
Al	Restante

Tabela III - Propriedades mecânicas e físicas das ligas de Al 6082-T651

Fonte: Adaptado de [42]

Propriedade	Valor
Densidade	2710 [kg/m ³]
Ponto de fusão	555 [°C]
Módulo de Elasticidade	70 [GPa]
Condutividade térmica	180 [W/m.K]
Resistência à tração	340 [MPa]
Dureza Vickers	95 [HV]

3.2 Máquina SPIF-A

A máquina SPIF-A foi uma máquina, toda ela construída de raiz pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (Figura 23).

O processo de estampagem incremental é um processo simples de deformação plástica que requer uma ferramenta simples, normalmente tem ponta semi-esférica, e uma folha de metal que vai ser estampada incrementalmente. É possível a produção de peças de grande complexidade devido à grande flexibilidade da SPIF-A (Figura 20).



Figura 20 – Cara humana de grande complexidade feita na SPIF-A

Fonte: Adaptado de [3]

O processo consiste no aperto da chapa de trabalho sobre a matriz, seguido do movimento coordenado do punção que leva à conformação da chapa segundo o modelo pretendido (Figura 21). Existem 2 modos de funcionamento, o manual e o automático.

No modo manual, o utilizador controla a máquina enviando as coordenadas das sucessivas posições que pretende que a máquina ocupe. Para operar em modo automático é necessário ter um programa que contenha todos os passos que a máquina deve executar. Basta colocar o programa a correr para que a máquina produza a peça pretendida (Figura 22).

O movimento pode ser controlado por um sistema de controlo CNC de 3 ou 5 eixos dependendo da complexidade da peça a estampar [3]. A seleção do número de eixos a utilizar pode ser consultado no guião de como operar a SPIF-A que se encontra no anexo C. No caso de haver necessidade de utilização de ângulos, devem ser utilizados os 5 eixos, caso contrário a utilização de 3 eixos é suficiente. O ângulo máximo admitido pela SPIF-A é de 20° . O movimento dos cilindros é accionado por uma central hidráulica.

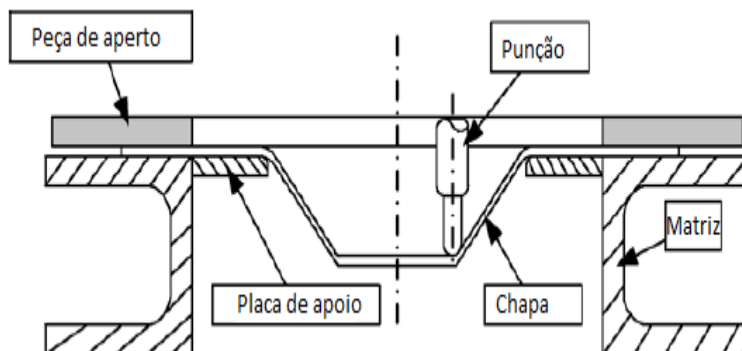


Figura 21 - Processo de estampagem incremental

Fonte: Adaptado de [3]

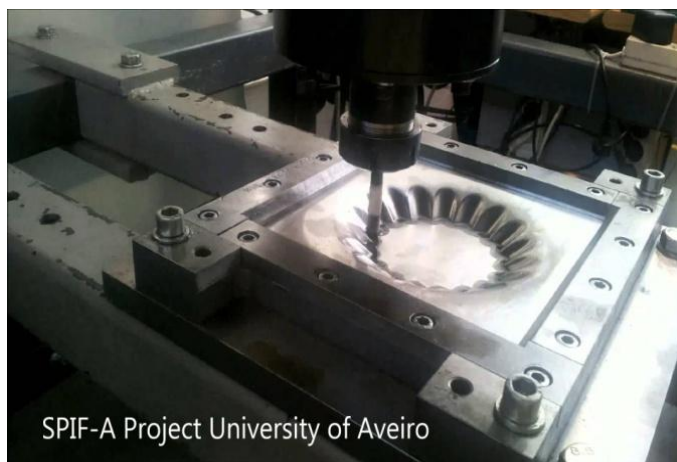


Figura 22 - Exemplo de Estampagem incremental

Fonte: Adaptado de [3]



Figura 23 - Máquina SPIF-A presente no DEM

Os principais constituintes da SPIF-A são o computador, controlador em tempo real, quadro eléctrico, central hidráulica e máquina (Figura 24) [3].

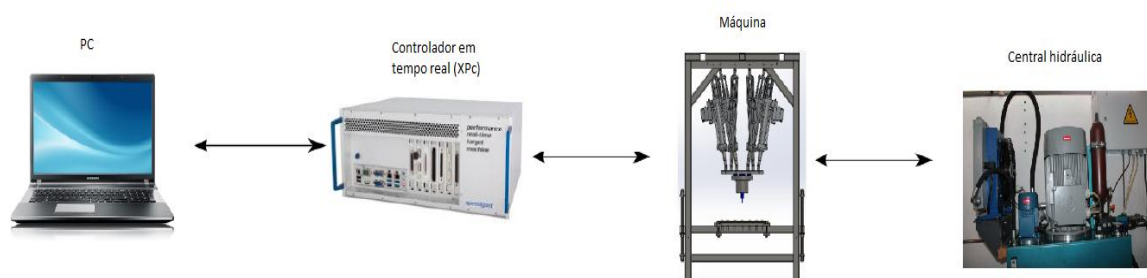


Figura 24 – Principais constituintes da SPIF-A

Fonte: Adaptado de [3]

O controlo da SPIF-A é feito via Simulink e Matlab. O controlador tem a principal função de fazer a ligação entre computador e máquina. Permite-nos ver os erros de posição dos cilindros, velocidade de avanço e forças aplicadas nos cilindros. A central hidráulica tem a função de alimentar a máquina com o fluxo de óleo.

As trajetórias dos ensaios iniciais serão apenas retilíneos mas graças à grande flexibilidade da SPIF-A, no futuro podem ser realizados ensaios com grande complexidade (curvas apertadas, ângulos, soldaduras em formas de onda).

A SPIF-A contém 6 cilindros hidráulicos o que resulta em 6 graus de liberdade e é capaz de aplicar grandes cargas de até 2 toneladas por eixo, dependendo da posição dos cilindros [3].

3.3 Tacómetro digital

O tacómetro digital é um dispositivo específico que permite medir a velocidade de rotação do motor (Figura 25). A utilização deste aparelho torna-se obrigatória nesta dissertação, pois o motor, que promove a rotação da ferramenta, é independente da SPIF-A. Assim sendo, não é possível monitorizar as velocidades de rotação a partir do controlador. Deste modo, a utilização do tacómetro digital torna-se imprescindível.



Figura 25 - Tacómetro digital utilizado durante os ensaios

3.4 Máquina de tração Shimadzu de 10kN modelo AGS-X STD +250

As máquinas de tração são constituídas por amarras que prendem ambas as extremidades do provete de tração. O objetivo é tracionar o provete até à sua rutura. A partir destes ensaios conseguimos obter gráficos tensão vs deformação e concluir sobre a resistência mecânica do material em estudo. O equipamento de tração utilizado está representado na figura 26.



Figura 26 - Máquina de tração Shimadzu de 10 kN modelo AGS-X STD +250

Capítulo 4- Trabalho Experimental e Resultados Obtidos

O trabalho realizado consistiu em:

1. Produzir uma mesa de fixação;
2. Obter e maquinar os provetes;
3. Saber operar a máquina e criar guias de funcionamento;
4. Realizar um ensaio preliminar com motor Danfoss 20 cm³;
5. Projetar as ferramentas;
6. Selecionar o tratamento térmico das ferramentas;
7. Adaptar a SPIF-A. Adquirir e maquinar novas peças para fixar o novo motor Danfoss de 80 cm³. Montagem;
8. Fixar o novo motor;
9. Realizar ensaios em chapas simples, sem junta, e verificar resultados;
10. Realizar alguns ensaios de soldadura topo a topo com mesa invertida;
11. Realizar um ensaio de tração.

4.1 Produção de uma mesa de fixação

A mesa de fixação foi modelada em catia V5 e posteriormente produzida no DEM-UA (Figura 27). A mesa de fixação foi criada para que se pudesse fazer a sua fixação à mesa principal da SPIF-A, e assim possibilitar a realização dos ensaios. A mesa de fixação é constituída por uma base, com um rasgo central que será o local onde serão feitas as soldaduras e por furos de ambos os lados do rasgo para que se possa aparafusar diretamente as chapas.

Foram feitos dois furos maiores para que a mesa de fixação se possa apertar à mesa principal da SPIF-A.

Também foram produzidas duas peças para realizar os apertos, caso não se pretenda furar as chapas a soldar. Os furos realizados nestas peças para aperto são concêntricos com os da base da mesa de fixação. Os desenhos da mesa de fixação e das peças de aperto encontram-se nos anexos A e B respetivamente.

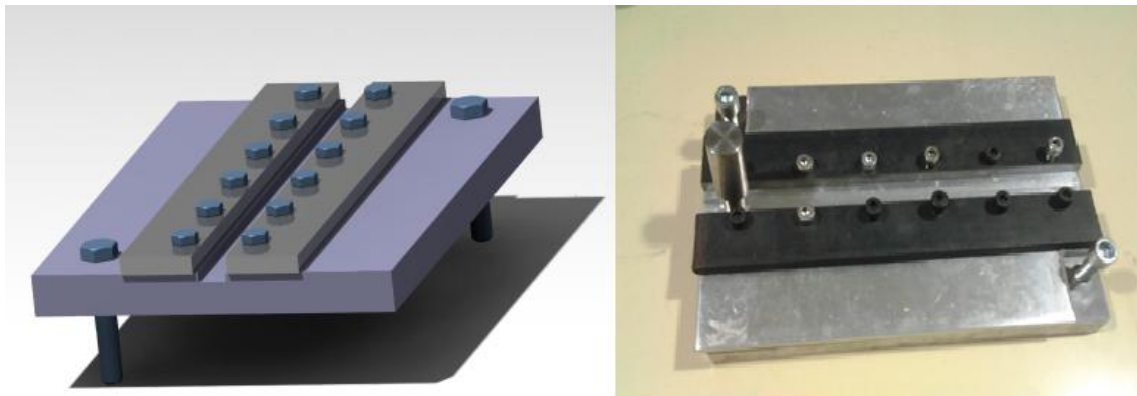


Figura 27 - Render da mesa de fixação e mesa de fixação produzida

4.2 Obter e maquinar provetes

A chapa de liga de alumínio 6082-T651 foi seccionada (obtenção dos provetes) numa guilhotina Guifil de 2 m. Em seguida, os provetes foram fresados, com uma fresadora ferramenteira First, nas zonas a soldar, para se obter um melhor contacto, e furados para que se pudessem fixar à mesa de forma a não permitir qualquer tipo de movimentos.

Houve o cuidado de obter vários provetes, para que se pudesse realizar um maior número de ensaios e assim, obter maior número de conclusões.

4.3 Saber operar a SPIF-A e criar guias de funcionamento

A SPIF-A não tem uma plataforma de comandos de fácil operação. Durante o período de aprendizagem de como operar a máquina, achou-se por bem, criar guias de funcionamento para que, no futuro, seja mais fácil e rápido começar a manobrar a SPIF-A.

Foram criados 2 guiões, um titulado de “Manual de utilização da SPIF-A” presente no anexo C e outro de “Manual de criação de ficheiros .mat” presente no anexo D. Para este último foi feito também um vídeo onde é criado um ficheiro .mat, a título de exemplo, que pode ser consultado no caso de surgir alguma dúvida. Este ponto é fundamental pois uma falha numa coordenada pode resultar em danos na SPIF-A ou em chapas de ensaio danificadas, cuja reutilização pode ficar impossibilitada.

4.4 Realização de um ensaio preliminar

Estava já instalado na SPIF-A um pequeno motor Danfoss de 20 cm³ de cilindrada e de 25 N.m de binário máximo. A ficha técnica encontra-se no anexo F. Realizaram-se dois ensaios com 2 ferramentas distintas. Uma de base convexa e outra de base plana. O esquema de montagem pode ser consultado na figura 28.

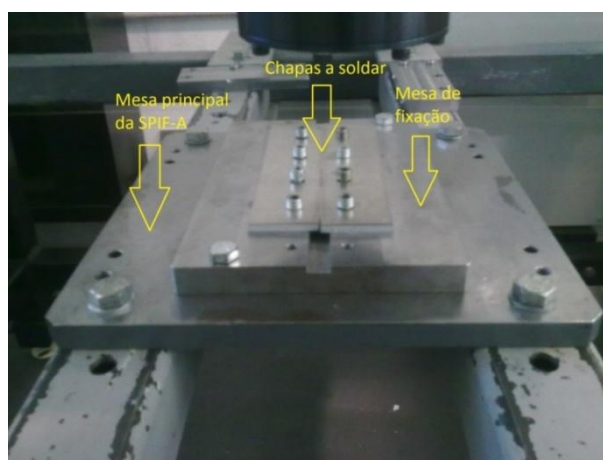


Figura 28 - Esquema de montagem para realização de ensaios

Como se pode verificar a partir da figura 29 o resultado foi catastrófico pois o motor não tinha binário suficiente. Sempre que a base da ferramenta entrava em contacto com o material, o aumento de atrito entre a base da ferramenta e a chapa a soldar era tal forma elevado que o motor parava constantemente, não sendo assim possível obter-se uma soldadura. Foi a partir deste ponto, que se chegou à conclusão que era necessário trocar o motor.



Figura 29 - Aspeto dos provetes no final do ensaio preliminar

A ferramenta que fez com que o motor parasse menos vezes a sua rotação foi a de base convexa, isto porque a área em contacto entre base da ferramenta e material não era tão grande como a da base plana e assim sendo o atrito também era menor.

Este efeito fez com que se tenha tirado a conclusão precipitada de que as ferramentas com base convexa eram melhores do que as planas. Facto que se viria a revelar precipitado em ensaios posteriores.

Foi devido a esta conclusão errada que se produziram várias ferramentas convexas e com dois ângulos diferentes.

De salientar também que durante o ensaio com a ferramenta plana, numa das paragens de rotação do motor, o pino da ferramenta se partiu, tendo sido necessário voltar a maquinar a ferramenta.

Após o ensaio fizeram-se alguns cálculos para se obter o valor do binário necessário no motor hidráulico para a realização das soldaduras. O binário total pode ser decomposto, de forma aproximada, em duas componentes, uma provocada pela base, induzida pelo atrito com o material a soldar (Equação 1), e outra devida ao pino da ferramenta (Equação 8), que se encontra introduzido na liga a soldar.

$$Binário_{atrito} = \frac{2}{3} \times \mu \times F_{axial} \times raio = 28 \text{ N.m} \quad \text{Eq.1}$$

Onde μ é o coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça a soldar, com um valor aproximado de 0,6 [48]. A força axial foi verificada experimentalmente e era da ordem dos 7 kN. O raio das bases das ferramentas considerado foi de 10 mm.

O binário provocado pelo pino da ferramenta, é devido à velocidade de avanço da ferramenta e respetiva rotação. Para efeitos de cálculo, considerou-se uma velocidade de rotação (n) e de avanço (v) de 500 rpm e 80 mm/min, respetivamente. Assumiu-se também um pino com comprimento e diâmetro, ambos de 6 mm. A figura 30 apresenta o esquema de cálculo do binário devido ao pino. As circunferências a preto e a vermelho representam a posição do pino antes e após meia rotação, respetivamente. A rotação e avanço simultâneos que existem no pino, provocam uma deslocação de material representado na figura 30 pela área a verde.

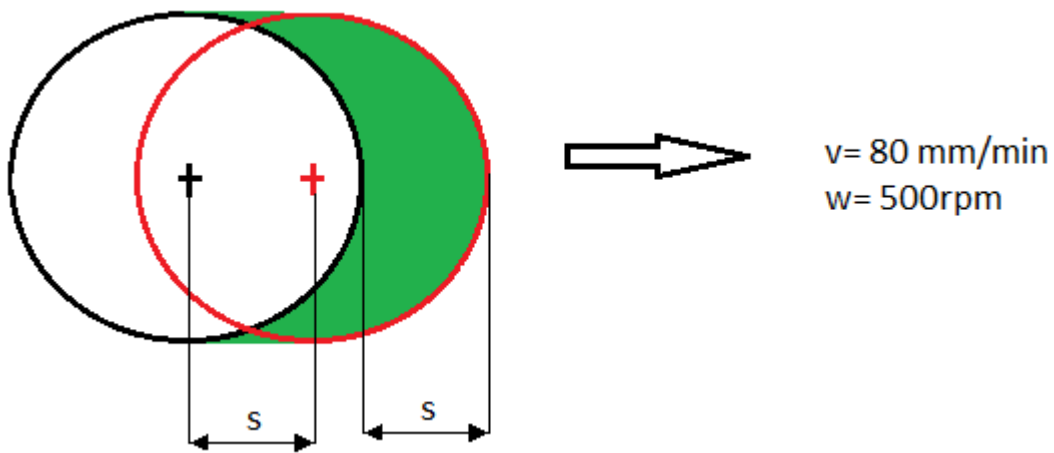


Figura 30 - Representação da deslocação do pino

A área média deslocada é dada por:

$$A = s \times h \quad \text{Eq.2}$$

Onde s é a largura aproximada de avanço, que representa o deslocamento do pino a cada meia volta da sua rotação, e h é a altura do pino. Por seu lado, assumindo velocidade de avanço constante,

$$s = v \times t \quad \text{Eq.3}$$

Onde t é o tempo, calculado por:

$$t = \frac{1}{n} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{500} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{1000} \text{ min} \quad \text{Eq.4}$$

Assim,

$$s = 80 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \times \frac{1}{1000} \text{ min} = 0,08 \text{ mm} \quad \text{Eq.5}$$

Portanto,

$$A = 0,08 \times 6 = 0,24 \text{ mm}^2 \quad \text{Eq.6}$$

Assumindo que o alumínio a soldar à sua temperatura de trabalho possui uma tensão de corte (σ) igual à tensão de cedência indicada na tabela VI, com o valor de 310MPa, a força na lateral do pino é dada por:

$$F = \sigma \times A = 310 \frac{N}{\text{mm}^2} \times 0,24 \text{ mm}^2 = 74,4 \text{ N} \quad \text{Eq.7}$$

Finalmente, o binário devido ao pino é dado por:

$$\text{Binário}_{\text{pino}} = F \times r = 74,4 \text{ N} \times 0,003 \text{ mm}^2 = 0,22 \text{ N.m} \quad \text{Eq.8}$$

Pelo que o binário total é:

$$\text{Binário}_{\text{total}} = \text{Binário}_{\text{atrito}} + \text{Binário}_{\text{pino}} = 28,22 \text{ N.m} \quad \text{Eq.9}$$

4.5 Projetar as ferramentas

A ferramenta é um dos mais importantes, senão mesmo o mais importante, parâmetro a ter em conta no que toca a soldadura por FSW. A geometria e o material que a compõem têm uma elevada importância no processo e podem ditar o sucesso ou o fracasso da soldadura. Para a produção das ferramentas foi utilizado aço AISI H13, cuja ficha técnica se encontra no anexo G. O aço foi escolhido tendo em conta a conformidade com as fontes anteriormente referidas no capítulo 2.








Assim sendo, foram produzidas 17 ferramentas com geometrias de pino variáveis, para salvaguardar qualquer imprevisto que pudesse ocorrer durante futuros ensaios. Tendo várias geometrias torna-se possível comparar as potencialidades de cada uma delas.

Ocorreu a ideia de produzir também ferramentas com um comprimento de pino de 3.5 mm (ligeiramente maior que metade da espessura dos provetes), para se realizar soldadura de ambos os lados dos provetes. Assim torna-se possível uma comparação com as ferramentas de pinos maiores. De salientar, que todas as ferramentas possuem roscas. Os desenhos estão presentes no anexo E.

A tabela IV, apresenta as 17 ferramentas e principais características.

Tabela IV - Lista de ferramentas produzidas

Nº Ferramenta	Tipo Base	Tipo pino	Características do pino
1	Plana 0°		Comprimento: 3.5 mm Ponta cilíndrica
2	Plana 0°		Comprimento: 6 mm Ponta cilíndrica
3	Plana 0°		Comprimento: 3.5 mm Ponta cilíndrica com chanfro
4	Plana 0°		Comprimento: 6 mm Ponta cilíndrica com chanfro
5	Plana 0°		Comprimento: 3.5 mm Ponta cilíndrica com chanfro
6	Plana 0°		Comprimento: 6 mm Ponta cilíndrica com chanfro
7	Convexa 2 mm 15.56°		Comprimento: 5.8 mm Ponta cilíndrica
8	Convexa 2 mm 15.56°		Comprimento: 3.5 mm Ponta cilíndrica
9	Convexa 2 mm 15.56°		Comprimento: 3.5 mm Ponta cilíndrica com chanfro
10	Convexa 2 mm 15.56°		Comprimento: 5.8 mm Ponta cilíndrica com chanfro

11	Convexa 2 mm 15.56°		Comprimento: 5.8 mm Ponta cônica
12	Convexa 2 mm 15.56°		Comprimento: 5.8 mm Ponta cônica
13	Convexa 5 mm 35.32°		Comprimento: 6 mm Ponta cilíndrica
14	Convexa 5 mm 35.32°		Comprimento: 5.8 mm Ponta cilíndrica
15	Convexa 5 mm 35.32°		Comprimento: 3.5 mm Ponta cilíndrica
16	Convexa 5 mm 35.32°		Comprimento: 5.8 mm Ponta cilíndrica com chanfro
17	Convexa 5 mm 35.32°		Comprimento: 3.5 mm Ponta cilíndrica com chanfro

4.6 Tratamento térmico das ferramentas

De forma a aumentar a vida útil das ferramentas, estas foram sujeitas a um tratamento térmico de têmpera em vácuo, feito pela empresa F. Ramada. A figura 31 mostra o aspecto físico das ferramentas, respectivamente antes e após o tratamento térmico.



Figura 31 - Aspecto físico das ferramentas antes e após o tratamento térmico

A dureza superficial obtida nas ferramentas após o tratamento térmico foi de 58/60 HRC segundo o relatório de ensaio não específico e que se encontra no anexo H.

4.7 Adaptação da SPIF-A. Adquirir e maquinar novas peças para fixar o novo motor Danfoss de 80 cm³

Dos ensaios preliminares concluiu-se que o motor antigo não tinha capacidade para realizar soldaduras das ligas de alumínio 6082-T651 com espessura de 6 mm. Para resolver o problema aplicou-se um motor com mais binário. Substituiu-se o anterior por um motor Danfoss de 80 cm³ de cilindrada e com 195 N.m de binário máximo, que já existia no DEM-UA, cujo binário é superior ao calculado na secção 4.4. A ficha técnica encontra-se no anexo I.

Para colocar o novo motor na máquina foi necessário produzir um suporte para alojar o motor hidráulico na árvore da SPIF-A. Tornou-se necessário também, adquirir um acoplador flexível e maquiná-lo de modo a encaixar no veio do motor, para fazer a ligação ao veio de transmissão. O veio de transmissão é roscado na extremidade que liga ao porta pinças de fixação da ferramenta para proporcionar o aperto (Figura 32).



Figura 32 - Veio de transmissão montado na peça inferior do acoplador flexível

Foram utilizadas as colunas que já se encontravam montadas na SPIF-A do motor antigo. A figura 33 mostra uma modelação em Catia V5 da árvore da máquina, enquanto a figura 34 apresenta a vista frontal do conjunto.

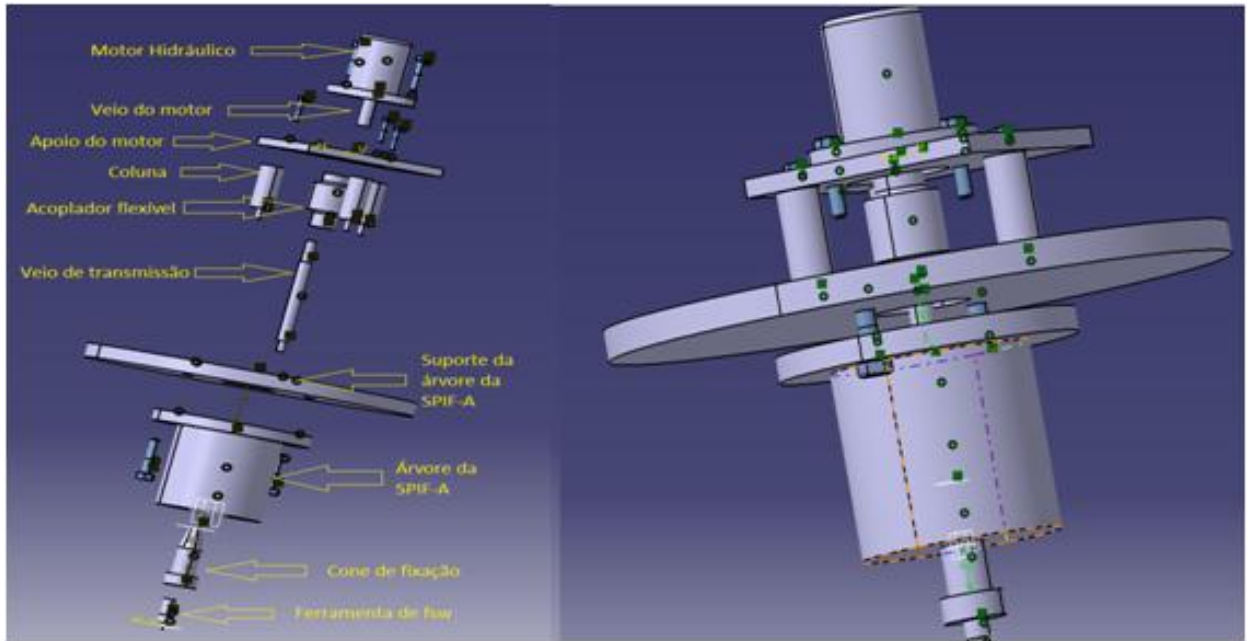


Figura 33 - Modelação simplificada em Catia V5 da árvore da máquina

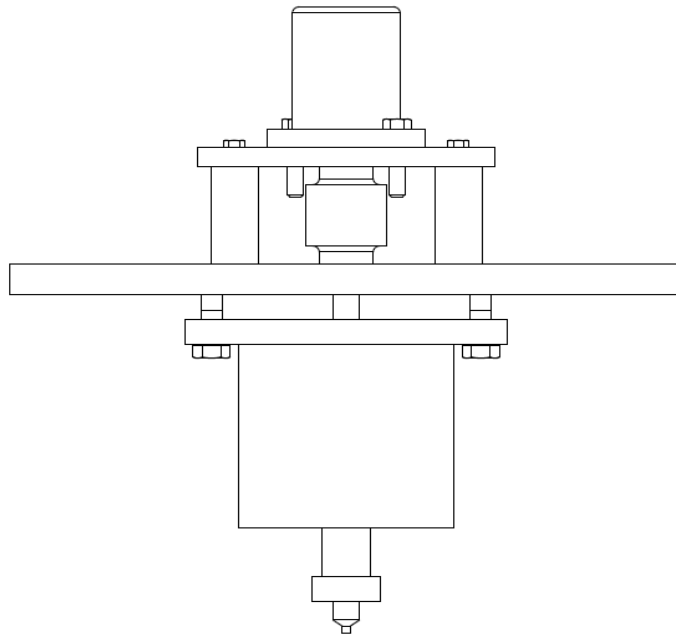


Figura 34- Esquema de transmissão de movimento do motor para a ferramenta

A central hidráulica que alimenta o motor é a mesma que alimenta os cilindros da SPIF-A.

A velocidade do motor, à semelhança dos cilindros da SPIF-A, é controlada pelo fluxo de óleo que se faz passar pelo circuito. Para uma maior velocidade de rotação do motor, maior terá de ser o fluxo de óleo que passa pelo mesmo. Quanto maior a velocidade dos cilindros maior o fluxo de óleo requerido para o seu acionamento.

4.8 Fixar o novo motor

As colunas são roscadas em ambas as extremidades, pelo que a sua fixação na árvore da SPIF-A é simples de fazer. As colunas têm a função de espaçadores (Figura 35) que assim permitem colocar o acoplador flexível entre o veio do motor e o veio de transmissão.



Figura 35 - Colunas, veio de transmissão e parte inferior do acoplador flexível montados na SPIF-A

O apoio do motor é suportado pelas 3 colunas que lhe ficam aparafusadas. No centro do apoio do motor há um furo de diâmetro 83 mm que aloja a flange do motor e simultaneamente permite a passagem do veio.

Na figura 36 podemos ver o apoio do motor modelado em Catia V5 e após a sua fabricação. O respetivo desenho encontra-se no anexo J.

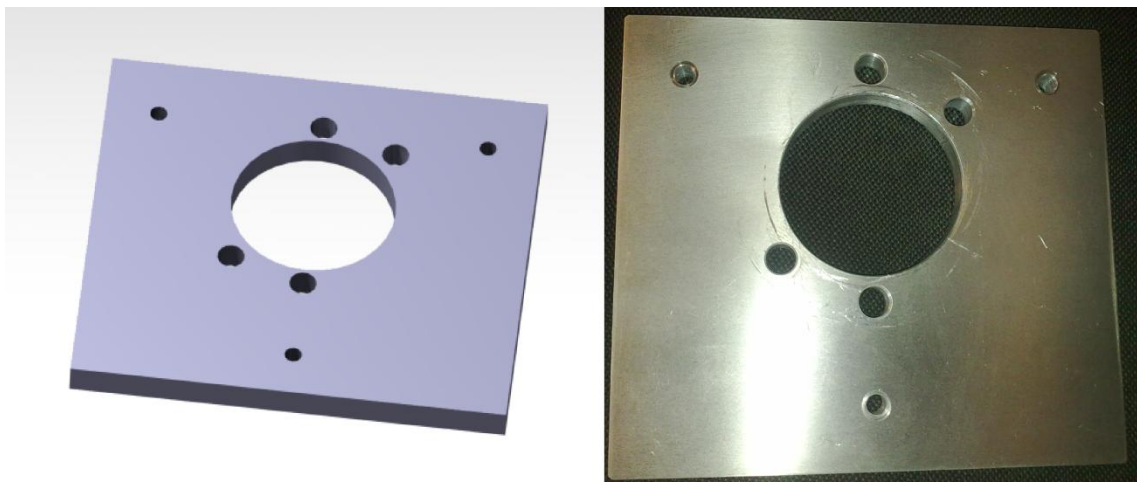


Figura 36 - Modelo em Catia e produto final do apoio do motor

No que diz respeito ao acoplador flexível, apenas foi necessário adquirir a parte superior. Isto porque já havia um acoplador flexível para o motor antigo, e assim aproveitou-se a parte central e inferior do acoplador que já tinha as medidas corretas para ligar ao veio de transmissão.

A parte superior foi, naturalmente, maquinada tendo em conta as dimensões do veio do novo motor (Figura 37). O desenho com as dimensões para a maquinação desta parte pode ser consultado na figura 38. As dimensões foram obtidas tendo em conta as regras do desenho, nomeadamente o sistema ISO 286 de ajustamentos de furo básico, para um deslizamento justo entre veio e acoplador.

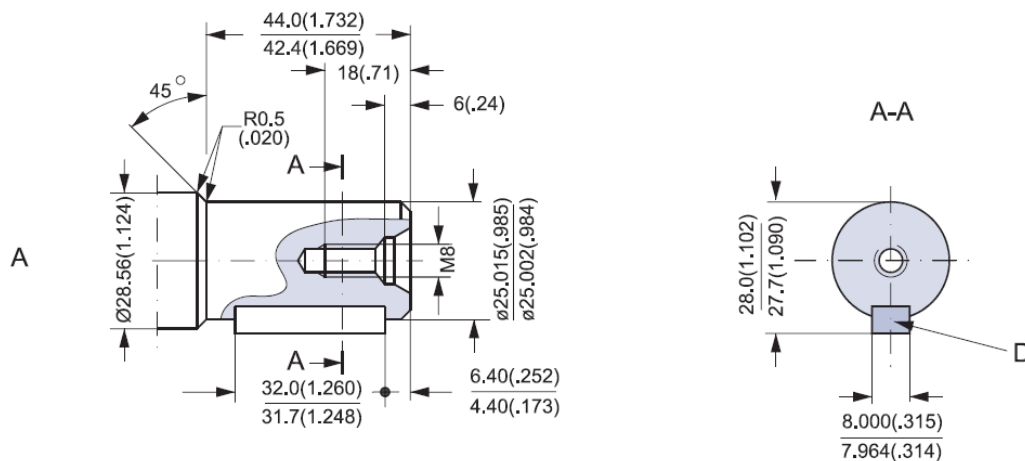


Figura 37 - Dimensões do veio do motor

Front view
Scale: 1:1

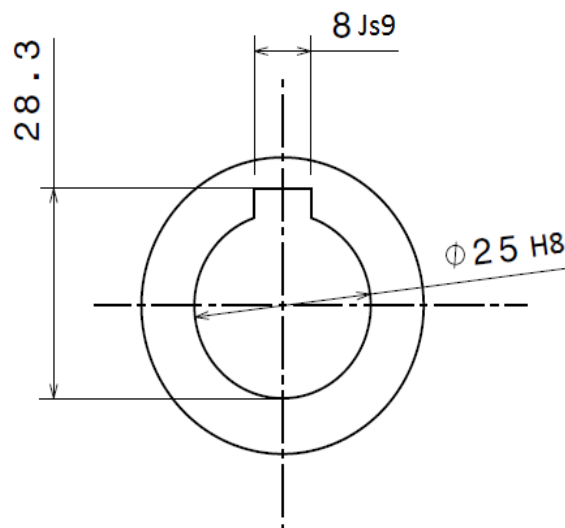


Figura 38 - Esquema para maquinação da parte superior do acoplador flexível

A figura 39 mostra o motor já fixo na árvore da SPIF-A. São visíveis as colunas que são roscadas no suporte da árvore da SPIF-A, o apoio do motor aparafusado às colunas e o motor pousado e fixo ao apoio. É possível também observar o acoplamento flexível em que a sua parte superior está ligada ao veio do motor e a sua parte inferior está ligada ao veio de transmissão.



Figura 39 - Motor montado na árvore da SPIF-A

De notar que, no processo de estampagem incremental, a ferramenta tem de ter um movimento de rotação livre. Assim sendo, sempre que se pretender realizar ensaios de estampagem incremental, será necessário proceder ao desacoplamento do motor hidráulico responsável pelo movimento de rotação da ferramenta de FSW.

4.9 Realizar ensaios em chapas simples, sem junta, e verificar resultados

Estes ensaios foram realizados com o intuito de verificar se o motor seria capaz de produzir as soldaduras pretendidas. Naturalmente, é imperativo que o motor não pare o seu movimento de rotação durante todo o processo. A velocidade de rotação utilizada nos ensaios foi de 500 rpm no sentido horário. O sentido de rotação tem de ser sentido horário, já que, de outro modo, iria ocorrer desaperto entre o veio de transmissão e o cone de fixação. A direção de avanço utilizada foi segundo o sentido negativo de X da SPIF-A. O referencial pode ser consultado em todas as imagens com ensaios realizados. O motor nunca parou durante o ensaio e os provetes têm melhor aspecto que os anteriormente ensaiados. Nestes ensaios foram usadas ferramentas de base plana e convexa de $35,32^\circ$ nomeadamente as de números 6 e 14 (Tabela IV).

Ensaio com a ferramenta número 6

O ensaio apresentou uma clara melhoria na capacidade de deformação plástica do material, quando comparado com o ensaio preliminar. Notou-se que houve pouca fuga de material devido à base plana. Observou-se também que o material que saiu do lado de recuo não conseguiu unir-

se ao lado de avanço (Figura 40). Este acontecimento, na altura, pensou-se que se poderia justificar pela baixa rotação do motor.

Fez-se variar de forma qualitativa a velocidade de avanço para se poder observar as diferenças no aspecto final dos provetes. Pode-se observar, através da figura 42, uma pequena zona em que se conseguiu efetivamente unir o material. No entanto, a figura 41 mostra o aparecimento de uma sobreespessura de material na parte inferior da raiz do cordão.



Figura 40 - Parte superior do provete após ensaio com ferramenta número 6



Figura 41 - Parte inferior do provete após ensaio com ferramenta número 6



Figura 42 - Local onde se conseguiu unir o material

Ensaio com a ferramenta número 14

Neste ensaio ocorreu fuga de material devido à geometria convexa da base. Uma vez mais o material que saiu do lado de recuo não se uniu ao lado de avanço, no entanto está mais próximo de se conseguir unir do que no ensaio com a ferramenta de base plana (Figura 43). De salientar o aparecimento de uma “onda” na parte inferior da chapa (Figura 44). Não se obteve qualquer tipo de ligação.



Figura 43 - Parte superior do provete após ensaio com ferramenta número 14

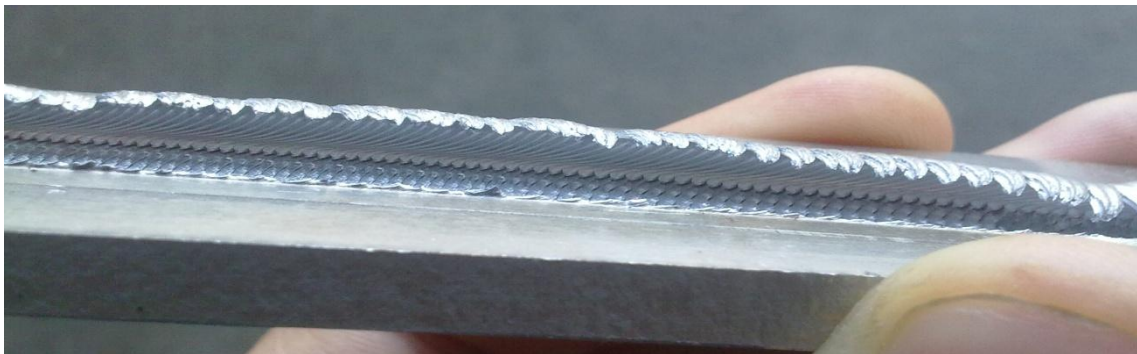


Figura 44 - Parte inferior do provete após ensaio com ferramenta número 14

As conclusões retiradas destes dois ensaios são que o motor tem binário suficiente, uma vez que não houve qualquer abrandamento notório na velocidade de rotação e que é necessário realizar mais ensaios para se encontrar os parâmetros ótimos para o processo.

O aparecimento do material na parte inferior da chapa fazia crer que o material se deformava, devido às elevadas forças verticais aplicadas na chapa. Em princípio, essa deformação faz com que o pino não atinja o fundo do material e não ocorra a plastificação do material deformado, facto que pode constituir uma explicação para a falta de ligação nas figuras 40 e 43.

Nesta altura pensou-se em 3 soluções para tentar corrigir os problemas que surgiram:

1. Colocar um novo motor que atingisse maiores velocidades de rotação, o que implicaria o uso de uma nova central hidráulica;
2. Colocação de um multiplicador de velocidade à saída do motor, mesmo que isso, naturalmente, reduzisse o binário disponível;
3. Inverter a mesa de fixação com o objetivo de evitar a fuga do material deformado e assim ter o material sempre em contacto com o pino e a base da ferramenta.

A primeira opção foi descartada devido aos elevados custos que implicaria. A utilização de multiplicadores seria uma boa opção, no entanto, os multiplicadores convencionais, têm dimensões consideráveis e que são superiores às admitidas pela árvore da SPIF-A. Existem também os multiplicadores epicicloidais ou planetários, que sendo compactos, acarretam também um elevado custo. Seria também necessário produzir um suporte para fixar o multiplicador à árvore da SPIF.

Deste modo, optou-se pela solução mais simples de inverter a mesa de fixação que não implica custos e é também a solução mais prática e rápida. Com esta alternativa, espera-se que a base das chapas e a base da mesa de fixação estejam em contacto, evitando que o material se escapasse para baixo.

4.10 Realização de soldaduras topo-a-topo com mesa invertida.

O objetivo de inverter a mesa de fixação (Figura 45) é de evitar a deformação do material e, deste modo, obrigar o material a estar sempre em contacto com o pino e a base da ferramenta.

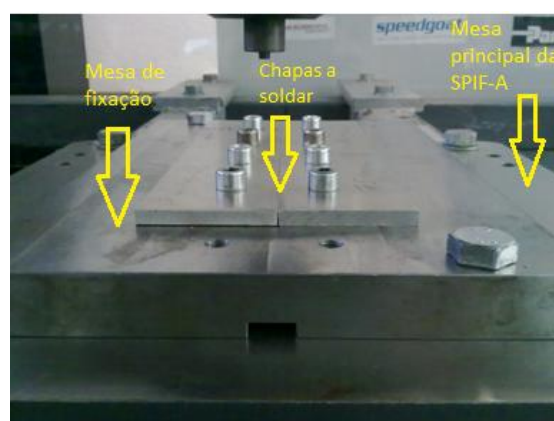


Figura 45 - Mesa de fixação invertida

Ensaaios com ferramenta número 1

A figura 46 mostra uma junta topo-a-topo na qual foram realizados dois ensaios. Os parâmetros velocidade de rotação e avanço foram de 700 rpm e 80 mm/min, respetivamente. A velocidade de rotação apresenta um valor intermédio ao indicado no estado de arte, enquanto a velocidade de avanço teve um valor mais baixo devido a algum receio na capacidade da máquina. No ensaio número 1 (mais à esquerda da imagem) observa-se que a base da ferramenta de FSW não entrou em contacto com as chapas, pelo que este ensaio se tornou inconclusivo. O ensaio número 2 (mais à direita da imagem), apresenta uma melhoria significativa do aspecto da soldadura, que, no entanto, não é perfeita. Isto pode dever-se a escolhas incorretas de parâmetros. Em ensaios futuros fez-se variar a velocidade e sentido de avanço. A opção de inverter a mesa de fixação surtiu efeitos positivos, pelo que nos ensaios seguintes, se continuou com essa posição.

No ensaio 2 é possível observar que a SPIF-A não fez um movimento retilíneo perfeito. É possível observar um ligeiro “zig-zag” na parte final do ensaio. Isto deve-se ao facto dos *cardans* da SPIF-A já não se encontrarem no melhor estado e fazerem com que ocorram vibrações.

O provete com os ensaios número 1 e 2 não foi seccionado, pois percebeu-se a olho nú que não se conseguiu obter ligação do material.

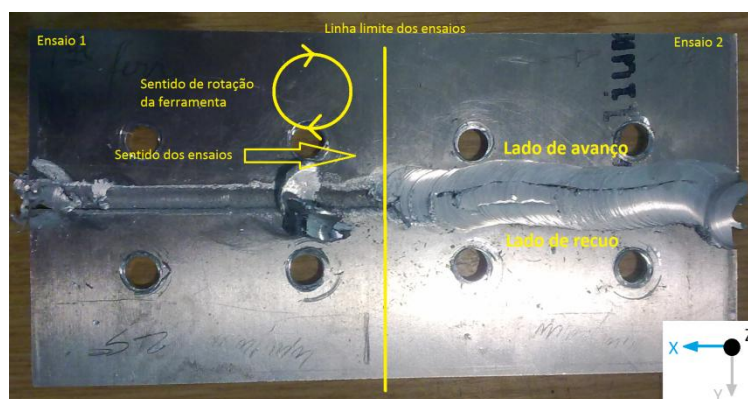


Figura 46 - Aspetto do provete após ensaio com a ferramenta número 1

Foi repetido o ensaio anterior, tendo o cuidado de garantir o encosto da base da ferramenta FSW com o provete. O ensaio 3 (Figura 47), realizado na linha de junta, apresenta as deficiências já antes notadas no ensaio 2, pelo que se decidiu alterar o parâmetro sentido de avanço. Ainda na mesma placa, na zona lateral à junta, foi agora feito um novo ensaio em sentido inverso de avanço, mantendo os restantes parâmetros. O aspecto visual melhorou significativamente (Figura 47).

Em seguida, o provete foi seccionado na guilhotina de modo a poder ser observado o seu interior. A figura 47 mostra o ensaio feito, segundo o eixo negativo do X na linha de junta (ensaio 3) e segundo o eixo positivo do X na parte lateral do provete (ensaio 4), enquanto que a figura 48 mostra o provete seccionado.

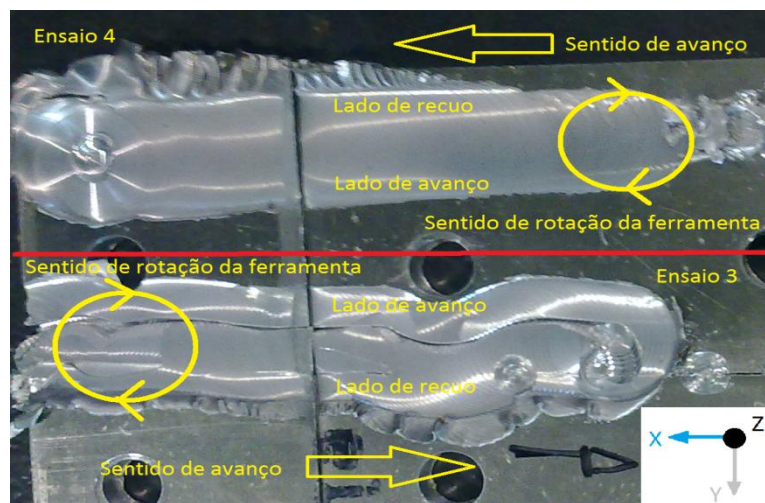


Figura 47 - Ensaio segundo o eixo negativo de X na linha de junta e segundo o eixo positivo de X na lateral do provete

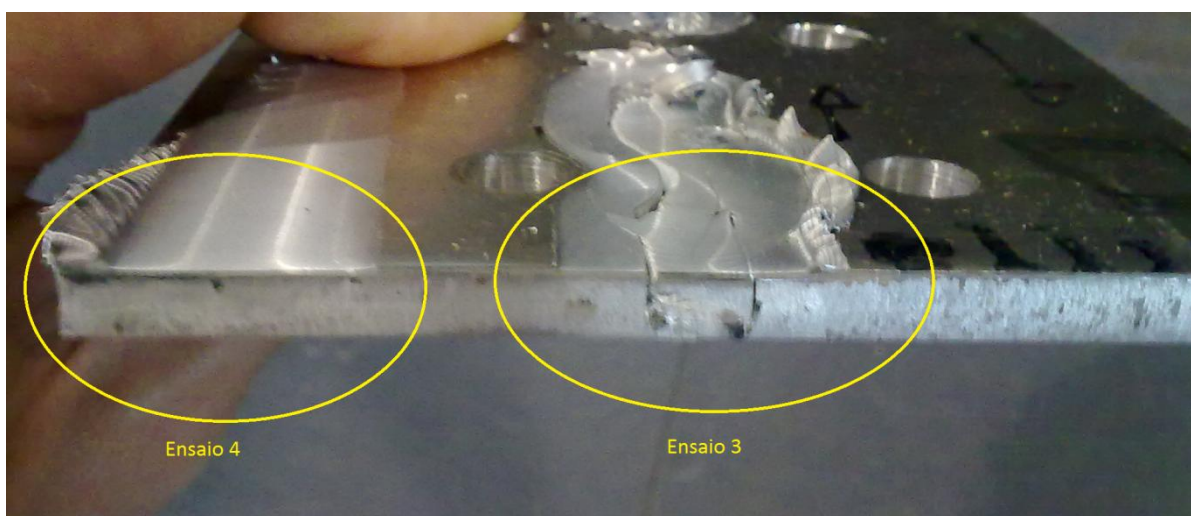


Figura 48 - Provede dos ensaios 3 e 4 seccionado

A figura 48 comprova que o ensaio 3, à semelhança do ensaio 2, também não teve sucesso. Pelo contrário, no ensaio número 4 obteve-se uma ligação quase perfeita do material. A partir deste ponto, todos os ensaios foram realizados segundo este novo sentido, com uma velocidade de rotação de 700rpm e com a mesa de fixação invertida, fazendo-se variar apenas as velocidades de avanço.

Os resultados dos ensaios 5,6,7,8,9 e 10 são apresentados na figura 49. Uma vez mais, fez-se ensaios na junta de soldadura do provete (ensaios 7 e 8) e na parte lateral, com a intenção de

aproveitar o material, simulando ensaios em chapa simples, sem junta (ensaios 5,6,9 e 10). Para estes ensaios foi utilizada uma velocidade de avanço de 150 mm/min. Os resultados visuais obtidos foram piores do que os resultados dos ensaios anteriores.

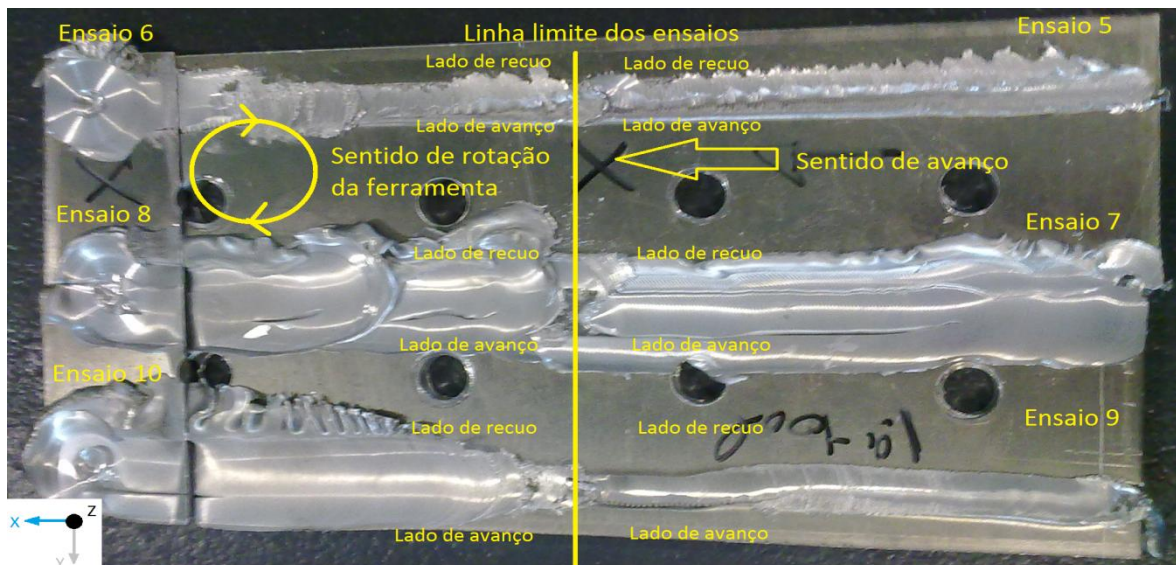


Figura 49 - Provete dos ensaios 5,6,7,8,9 e 10

Os ensaios 5,6 e 9 são inconclusivos pois a base volta a não atingir a superfície das chapas a soldar. No ensaio 10 há um bom início mas, na parte final, surge um defeito na soldadura. Os ensaios 7 e 8 apresentam também bastantes defeitos superficiais. O provete foi depois cortado à guilhotina pelo local onde parecia haver soldadura entre as duas chapas (ensaio 8). No entanto, a secção apresentada na figura 50 mostra que, de facto, não houve ligação do metal.



Figura 50 - Provete dos ensaios 6,8 e 10 seccionado

Os defeitos anteriormente verificados surgem pelo facto de se ter aumentado a velocidade de avanço ou de o pino ter andado descentrado da linha de junta.

É possível verificar-se também que, à medida que a ferramenta avançou, esta pareceu penetrar mais no material. Este fenómeno tornou-se mais evidente, nomeadamente, nos ensaios 4, 6 e 10. Tal efeito poderia dever-se ao facto de a mesa principal da SPIF-A estar desnivelada, que não foi o caso, *cardans* desgastados da máquina ou devido ao aumento de temperatura que leva ao amaciamento do material, tornando-o assim mais penetrável.

Este problema leva a crer que, na fase de penetração, a ferramenta não avançou totalmente até a base atingir a chapa e que ao longo do percurso a ferramenta foi reajustando a sua posição acabando por penetrar demasiado. Nessa altura supôs-se que as folgas dos *cardans* impediam o controlo rigoroso do movimento nos vários eixos. Assim, no início, com o provete frio, a força de penetração era substancialmente maior que durante o avanço pelo que a cota de posição em altura da ferramenta teria necessariamente de variar.

No ensaio seguinte, ensaio 11, voltou-se a utilizar uma velocidade de avanço de 80 mm/min e realizou-se soldadura por ambos os lados do provete. No entanto, o problema da penetração excessiva da ferramenta no final dos ensaios voltou a acontecer neste ensaio, como se pode ver na figura 51. O excesso de material presente no lado de recuo faz com que haja o aparecimento da fissura na parte superior da soldadura. Este efeito é mais visível na figura 52. É portanto, crucial evitar que a base da ferramenta FSW penetre demasiado no material base.

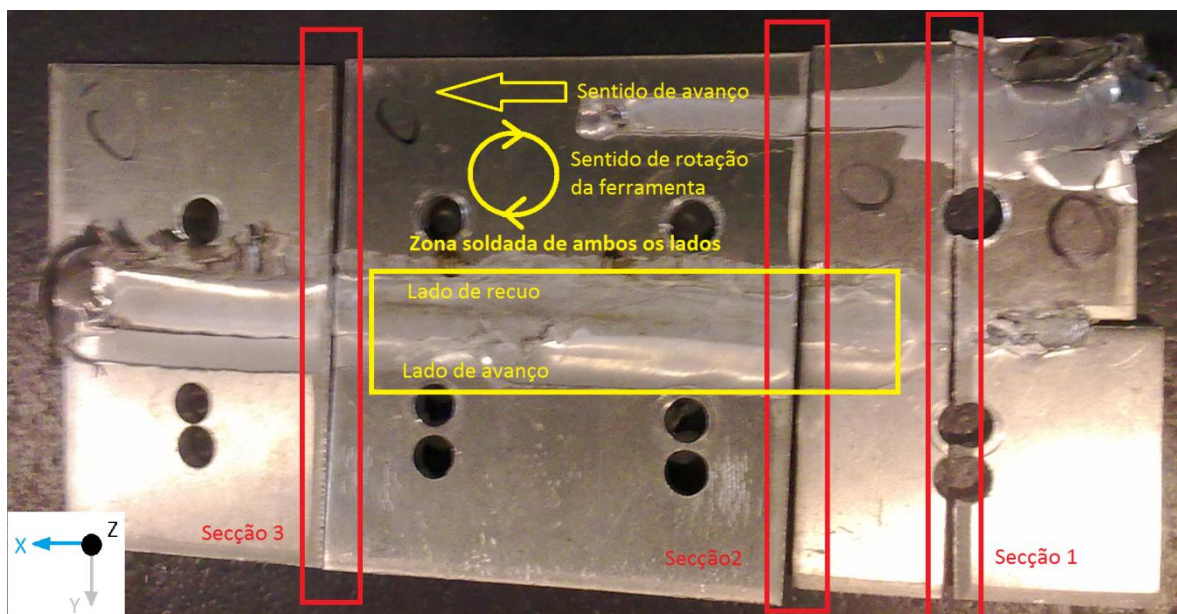


Figura 51 - Parte superior do provete soldado de ambos os lados

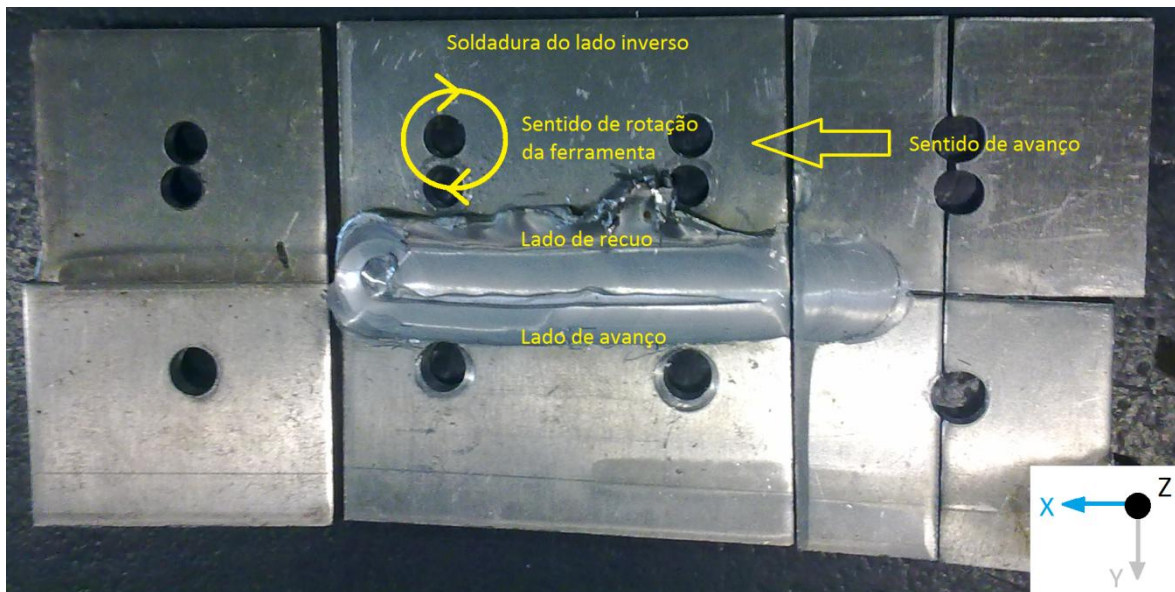


Figura 52 - Parte inferior do provete soldado de ambos os lados

Este provete foi seccionado em 3 zonas. A secção 1 (Figura 51) foi feita num local onde a base da ferramenta FSW ainda não tinha atingido a chapa. No local da junta apenas se fez a soldadura da parte superior da chapa. A figura 53 mostra os defeitos em profundidade na secção 1.

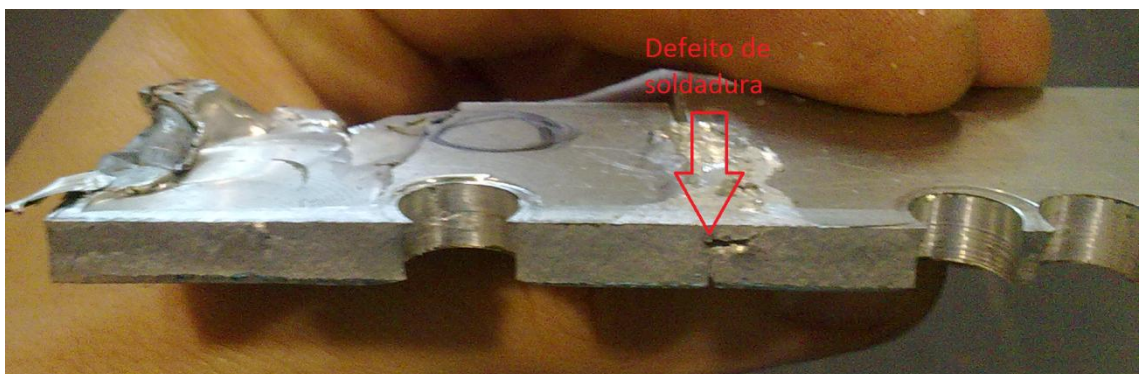


Figura 53 – Defeito quando a base da ferramenta FSW não entra em contacto com chapa – secção 1

A secção 2 foi feita no local onde se soldou de ambos os lados. Apesar dos defeitos presentes na superfície (Figura 52), seccionou-se o provete num local livre de fissuras superficiais. É possível constatar, através da figura 54, que se conseguiu unir o material. Será necessário efetuar pelo menos um ensaio de tração à junta para verificar a qualidade da ligação.

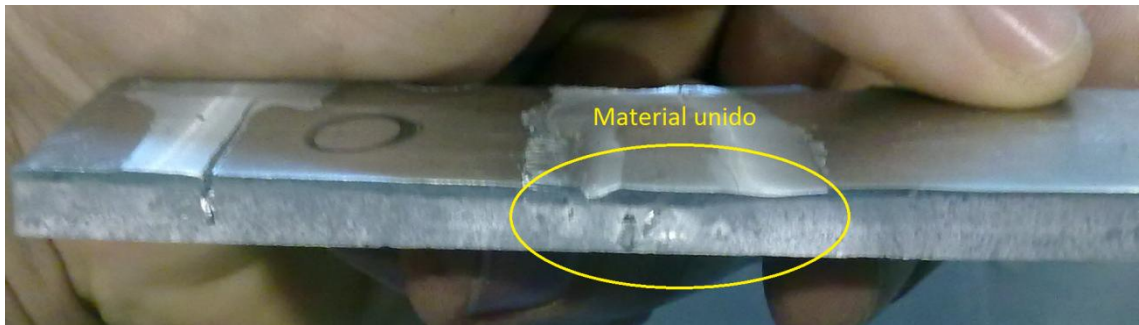


Figura 54 - Material unido - secção 2

A secção 3 foi feita num local onde a base da ferramenta FSW esteve em contacto com as chapas a soldar. A figura 55 mostra que se conseguiu unir a parte superior do material, no entanto, como não se fez o ensaio de ambos os lados nesta zona, consegue-se ver a linha de junta pois a ferramenta número 1 tem apenas um comprimento de pino de 3.5 mm que faz com que não atinja a espessura total de 6 mm das chapas a soldar.



Figura 55 - Material unido e linha de junta - secção 3

Nesta altura, conseguiu-se obter ligações apenas nos locais onde a base da ferramenta FSW estava em contacto com as chapas a soldar. Isto revela que é possível a realização de soldaduras na SPIF-A. No entanto, era necessário resolver os problemas de falta de penetração e de penetração excessiva da ferramenta no início e final dos ensaios, respectivamente.

Numa tentativa de evitar estes fenómenos, realizaram-se dois novos ensaios, os ensaios 12 e 13, em que se fez a penetração mais lentamente, de forma a conseguir aquecer e amaciar o material e colocar a base em contacto. Após este passo, fez-se o movimento de translação onde se foi aumentando gradualmente a velocidade de avanço para que o material não aquecesse de mais e, assim evitar a penetração excessiva.

A velocidade de avanço no início do ensaio foi de 80 mm/min terminando o cordão com uma velocidade de 300 mm/min em ambos os ensaios. O provete obtido pode ser visto na figura 56 e, como se pode verificar no ensaio 12, a base não entrou em contacto logo no início do ensaio. Isto significa que a velocidade de penetração tem de ser mais baixa. No ensaio 13, a penetração ocorreu como devido, logo de início, e fazendo variar a velocidade de avanço, conseguiu-se um

provete com muito bom aspeto, sem grande quantidade de material expulso no lado de recuo e sem fissuras superficiais.

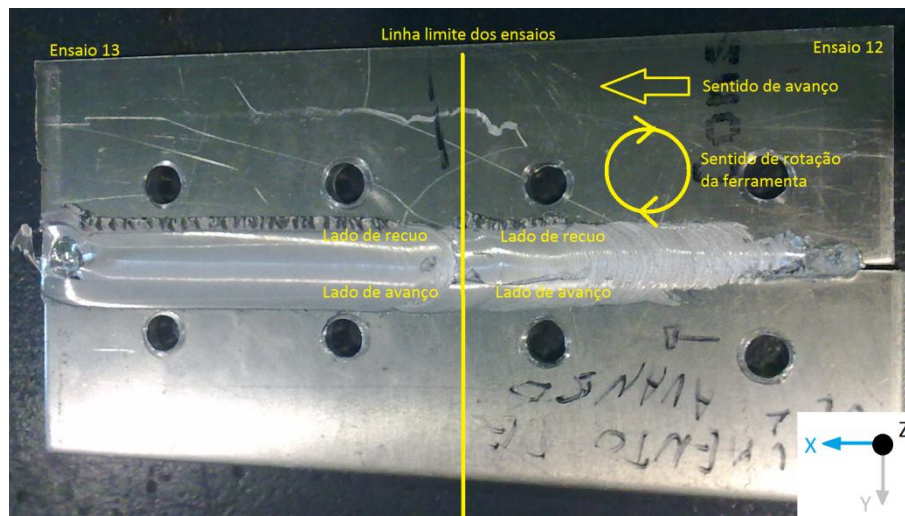


Figura 56 - Aspecto do provete fazendo variar a velocidade de avanço

4.11 Realização de um ensaio de tração

Como já foi referido anteriormente, no ensaio 11 realizou-se uma soldadura de ambos os lados das chapas e a figura 54 aparenta uma união do material. De modo a conseguir uma conclusão mais fiável quanto à resistência mecânica da soldadura, maquinaram-se as chapas soldadas, para a realização de um ensaio de tração (Figura 57). O provete foi recolhido transversalmente à soldadura com corte por guilhotina e seguidamente maquinado em todas as faces no centro de maquinação CNC Mikron VCE 500 existente no DEM (Figura 58), tendo o cuidado de centrar a linha de soldadura com o seu comprimento. As dimensões do provete para tração, conforme a norma ISO 6892-1:2009 [44], encontram-se no anexo K.

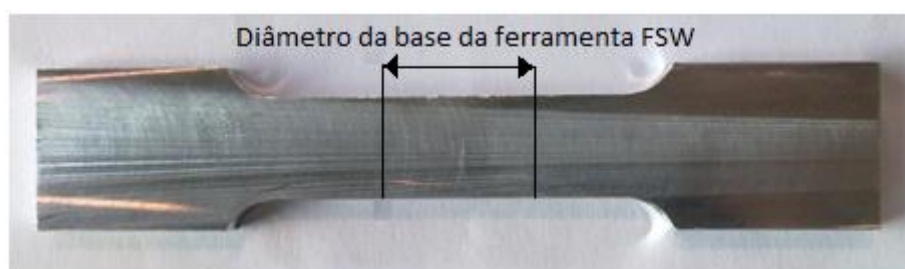


Figura 57 - Provete de tração obtido após maquinação das chapas soldadas



Figura 58 - Centro de maquinação CNC presente no DEM

Como as temperaturas atingidas durante a soldadura são relativamente elevadas, é suposto considerar-se que, na zona de soldadura, o tratamento térmico T6 existente nas placas de alumínio não soldadas, perderá algum efeito. A tabela V mostra que as propriedades mecânicas da liga de alumínio 6082 tratada termicamente são bastante diferentes da não tratada apresentando valores de 340 MPa e 130 MPa, respetivamente [45].

Tabela V - Propriedades mecânicas da liga 6082 tratada e não tratada termicamente

Fonte: Adaptado de [45]

Estado da liga	Resistência à tração [MPa]	Tensão de Cedência [MPa]	Resistência ao corte [MPa]	Dureza Vickers [HV]	Alongamento [%]
6082	130	60	85	35	27
6082-T6	340	310	210	95	11

Após o tratamento dos dados obtidos do ensaio de tração, foi obtido o gráfico tensão real vs deformação real que se encontra representado na figura 59. O ensaio foi realizado com uma velocidade de deslocamento do travessão da máquina de 3 mm/min.

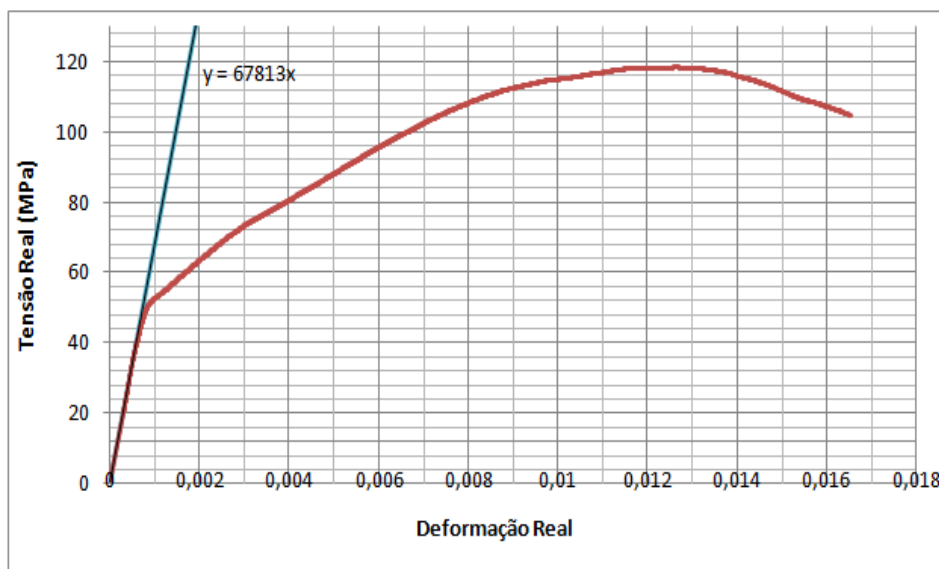


Figura 59 - Gráfico Tensão Real vs Deformação Real

Os resultados do ensaio de tração são indicados na Tabela VI.

Tabela VI - Resultados do ensaio de tração

Estado da liga	Resistência à tração [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Alongamento [%]
Soldada por FSW	118	51	68	1.6

Os valores obtidos são bastante próximos daqueles da liga 6082 não tratada, exceto o alongamento que foi muito inferior. É, no entanto, um resultado positivo embora, claramente, necessite de mais investigação. O estado do provete após o ensaio de tração pode ser consultado na figura 60. Tendo em conta o aspecto da fratura do provete e do pouco alongamento obtido, considera-se a soldadura como frágil. Através do baixo alongamento obtido conclui-se que existem problemas na soldadura.

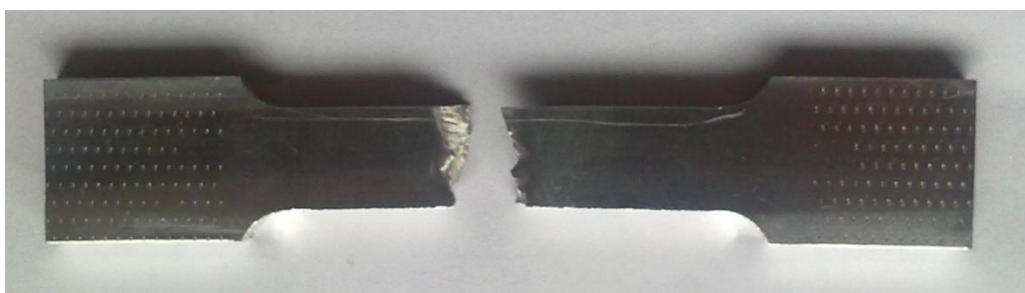


Figura 60 - Provete de tração após ensaio de tração

Capítulo 5- Conclusões, discussão dos resultados obtidos e trabalho futuro

A máquina de estampagem incremental SPIF-A existente no DEM tem capacidade para produzir soldaduras por FSW. A troca de motores trouxe claras melhorias aos ensaios realizados, sendo que se conseguiu unir o material em alguns dos testes realizados.

A criação dos guiões de trabalho da SPIF-A foi uma parte importante desta dissertação pois vai permitir uma aprendizagem rápida de como operar a máquina e evitar potenciais erros que possam danificar a mesma.

No entanto, têm de ser evitadas as vibrações e oscilações durante o processo. Para que tal seja possível, os *cardans* da SPIF-A têm necessariamente de ser substituídos. Será também interessante a elaboração de uma plataforma de mais fácil operação da SPIF-A, para que no futuro seja mais rápida a aprendizagem e manipulação da mesma.

As ferramentas de bases convexas, revelaram-se pouco úteis neste tipo de processo, pelo que os ensaios futuros devem incidir nas ferramentas de bases planas. A base da ferramenta deve estar sempre em contacto com a chapa a soldar, mas há que ter o cuidado de não deixar a base penetrar demais, caso contrário, o material é movido para o lado de recuo e ocorre o aparecimento de fissuras superficiais nas chapas soldadas. O pino da ferramenta durante o movimento de translação deve estar sempre alinhado com a junta de soldadura.

No que se refere ao ensaio de tração, o provete cedeu aos 51 MPa e rompeu aos 118 MPa, valores próximos da tensão limite elástica e tensão de rutura para a liga de alumínio 6082 sem tratamento térmico e, assim sendo, considera-se um resultado bastante positivo.

Dos ensaios feitos durante esta dissertação, conclui-se que o sentido de avanço a ser utilizada durante os ensaios deve ser segundo o eixo X da SPIF-A e a mesa de fixação deve estar invertida.

O motor hidráulico que aciona a ferramenta FSW deve ser alimentado por uma nova central hidráulica autónoma, que dispusesse de um maior caudal, pois isso permitiria obter uma maior velocidade de rotação e assim experimentar uma gama mais alongada de parâmetros.

A realização dos ensaios futuros deve incidir principalmente na procura dos parâmetros ótimos de soldadura e na realização de mais ensaios de tração, com o objetivo de verificar a resistência mecânica das soldaduras. Paralelamente, devem ser obtidas micro e macrografias do cordão e da zona termicamente afetada, com o intuito de avaliar a qualidade da soldadura. O tratamento térmico pós-soldadura será também uma ferramenta no caminho da qualidade.

Finalmente, utilizando a grande flexibilidade da SPIF-A, no futuro, esta pode ser usada para a realização de soldaduras mais complexas e até de outros materiais como, por exemplo, o aço.

Bibliografia

- [1] Loureiro A., Friction Stir Welding: Parâmetros de processo e aplicações, CEMUC, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, 2013
- [2] Franco V., Processos de soldadura e corte térmico. Tecnologia Mecânica, Engenharia de Máquinas Marítimas, Escola Superior Náutica Infante D. Henrique, 2011
- [3] Bastos R., Controlo de uma plataforma servo-hidráulica com cinemática paralela para estampagem incremental, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2014
- [4] Attallah M., Preuss M., 2 - Inertia friction welding (IFW) for aerospace applications: Welding and Joining of Aerospace Materials, Volume null, Issue null, ed: M.C. Chaturvedi, Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, pp. 25-74, 2012
- [5] TWI – The Welding Institute. Friction and forge welding processes for the automotive industry. Disponível em: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-and-forge-welding-processes-for-the-automotive-industry-september-1999/> [Data da consulta: 06/07/2015]
- [6] TWI – The Welding Institute. What is radial friction welding? Disponível em: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-radial-friction-welding/> [Data da consulta: 05/07/2015]
- [7] Lütjering G., Williams J., Titanium(Second Edition): Engineering Materials and Processes, ed: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 383-415, 2007.
- [8] TWI – The Welding Institute. Linear friction welding. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=iG3t0Q7UuCU> [Data da consulta: 06/07/2015]
- [9] Freeman R., 1 - New welding techniques for aerospace engineering, in Welding and Joining of Aerospace Materials, ed: M.C. Chaturvedi, Woodhead Publishing Limited, pp. 3-24, 2012
- [10] Weman K., Welding Processes Handbook (Second Edition): Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, pp. 119-132, 2012.
- [11] Mishra R., Friction Stir Welding and Processing (First Edition), ed: Mahoney M., Publisher: ASM International, pp. 273-308, 2007
- [12] Kumbhar N., Dey G., Bhanumurthy K., Friction Stir Welding of Aluminium Alloys: Materials Science Division and Scientific Information Resource Division, BARC NEWSLETTER, Research Article, pp. 11- 14, 2011.
- [13] Forum Science & Technology. FSW (Friction Stir Welding). Disponível em: <http://www.chess.com/groups/forumview/fsw-friction-stir-welding> [Data da consulta: 06/07/2015]

- [14] Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H., Recent advances in friction stir welding – Process, weldment structure and properties: Progress in Materials Science 53, pp. 980-1023, 2008.
- [15] Fonda R., Bingert J., Colligan K., Microstructural development in friction stir welding: Chemical/biochemical research, NRL Review, pp. 121-122, 2005
- [16] Cardoso M. Trabalho de Tecnologia de soldadura – Técnica de Soldadura por fricção. Disponível em: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAA2zUAE/tecnologia-soldagem-por-friccao> [Data da consulta: 10/07/2015]
- [17] Kalle S., Nicholas D. Friction Stir Welding at TWI. Disponível em: <http://materialteknologi.hig.no/Lettvektdesign/joining%20methods/joining-welding-friction%20stir%20weld.htm> [Data da consulta:15/07/2015]
- [18] Robotic Friction Stir Welding Automation. Courtesy of CRIQ. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=aNbQH8XBgXQ> [Data da consulta: 06/07/2015]
- [19] Rodrigues D., Loureiro A, Leal R. Soldadura por Fricção Linear. Disponível em: http://www2.dem.uc.pt/dulce.rodrigues/ref_web/rn_1.pdf [Data da consulta: 10/07/2015]
- [20] Surendrababu P., Krishna A, Rao C, Material Flow Behaviour in Friction Stir Welding Process- A: Critical Review On Process Parameters and Modeling Methodologies. Volume 3, Issue 6, pp. 219 – 222, 2013
- [21] Alma Mater Studiorum Università Di Bologna. Friction Stir Welding (FSW). Disponível em: <http://www.masterlab.unibo.it/english/research/fsw.htm> [Data da consulta: 06/07/2015]
- [22] Tozaki Y., Uematsu Y., Tokaji K., A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance: Journal of Materials Processing Technology, Volume 210, Issues 6-7, pp. 844-851, 2010
- [23] Bakavos D., Chen Y., Babout L., Prangnell P., Babout L., Material interactions in a novel pinless tool approach to friction stir spot welding thin aluminum sheet: Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 42, Issue 5, pp. 1266-1282, 2011
- [24] Zhang Y., Cao X., Larose S., Wanjara P., Review of tools for friction stir welding and processing: Canadian Metallurgical Quarterly, Published by Maney on behalf of the Institute, Volume 51, Issue 3, pp. 250 – 259, 2012
- [25] Ding R., Force characterization on the welding pin of a friction stir welding retractable pin-tool using aluminum-lithium 2195, Proceedings of the Second International Conference on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, 2000
- [26] Skinner M., Edwards R., Improvements to the FSW process using the self-reacting technology: Materials Science Forum, Volumes 426-432, pp. 2849-2854, 2003

- [27] Self Reacting Friction Stir Welding. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=_qAOKR6mdTI [Data da consulta: 06/07/2015]
- [28] Mishra R., Ma Z., Friction stir welding and processing: Materials Science and Engineering R 50, Reports: A Review Journal, pp. 7-78, 2005
- [29] Thomas W., Nicholas E., Needham J., Temple-Smith P., Kallee S., Dawes C., Friction stir welding, UK Patent Application 2306366, 1996.
- [30] Dawes C., Thomas W, Development of improved tool designs for friction stir welding of aluminum, Proceedings of the First Welding Aluminium Conference on Friction stir welding, Thousand Oaks, California, USA, 1999
- [31] Vaze S., Xu J., Ritter R., Colligan. K, Fisher J., Jr, Pickens J., Friction stir processing of aluminum alloy 5083 plate for cold bending: Materials Science Forum, Volumes 426-432, pp. 2979-2986, 2003
- [32] Vilaça P., Fundamentos do Processo de Soldadura por Fricção Linear – Análise Experimental e Modelação Analítica, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2003.
- [33] Adamowski J., Gambaro C., Lertora E., Ponte M., Szkodo M., Analysis of FSW welds made of aluminium alloy AW6082-T6, Archives of Materials Science and Engineering, Volume 28, Issue 8, pp. 453-460, 2007.
- [34] ASME – The American Society of Mechanical Engineers. Effect of compliance and Travel Angle on Friction Stir Welding With Gaps Disponível em: <http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1454858> [Data da consulta: 06/07/2015]
- [35] Rai R., Bhadeshia H., DebRoy T., Review: friction stir welding tools, Science and Technology of Welding and joining, Volume 16, No 4, pp. 327-331, 2011.
- [36] Chao J., Qi X., Heat Transfer and Thermo-Mechanical Analysis of Friction Stir Joining of AA6061-T6 Plates: Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Weldings, Rockwell Science Center, Thousand Oaks, California, 1999.
- [37] Schmidt H., Hattel J., A local model for the thermomechanical conditions in Friction Stir Welding: Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, Volume 13 (1), pp. 77-193, 2005.
- [38] Reynolds A., Lockwood W., Seidel T., Processing-Property Correlation in Friction Stir Welds: Materials Science Forum, Vol. 331-337, pp. 1719-1724, 2000.

[39] TWI – The Welding Institute. Friction stir welding of aluminium alloys. Disponível em: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-of-aluminium-alloys/> [Data da consulta: 06/07/2015]

[40] Heinz B., Skrotzki B., Characterization of a friction-stir-welded aluminum alloy 6013: Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 33, Issue 3, pp. 489-498, 2002.

[41] Jonckheere C., Meester B., Denquin A., Simar A., Torque, temperature and hardening precipitation evolution in dissimilar friction stir welds between 6061-T6 and 2014-T6 aluminum alloys, Journal of Materials Processing Technology, Volume 213, pp. 826-837, 2013

[42] Company: Aalco. Aluminium Alloy – Commercial Alloy – 6082 – T6~T651 Plate. Disponível em: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6082-T6T651-Plate_148.ashx [Data da consulta: 06/07/2015]

[43] Fuller B., Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs: Friction Stir Welding and Processing, ed: Mahoney M., Publisher: ASM International, pp. 7-35, 2007

[44] ISO 6892-1:2009. Metallic materials – Tensile testing – Part1: Method of test at room temperature

[45] Company: Metals4U. 6082/6082T Aluminium. Disponível em: <https://www.metals4u.co.uk/6082-6082T-Aluminium.asp> [Data da consulta: 20/10/2015]

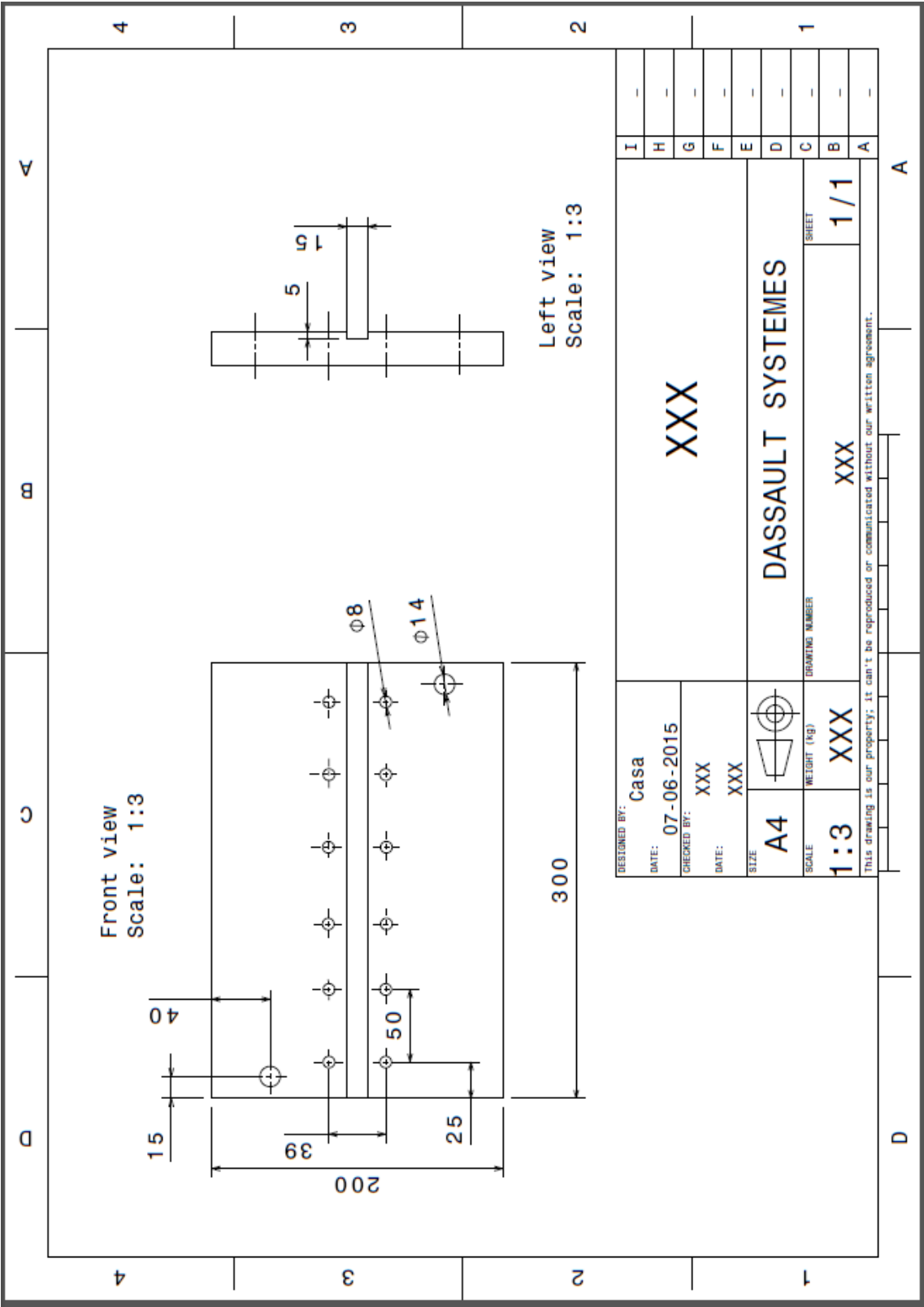
[46] Rodrigues M., Leitão C., Louro R., Gouveia H., Loureiro A., High speed friction stir welding of aluminium alloys, Science and Technology of Welding and Joining, Volume null, No null, pp.1-6, 2010

[47] Silva F., Tecnologia da Soldadura, Uma abordagem Técnico-Didática, Primeira Edição, p.190, 2014

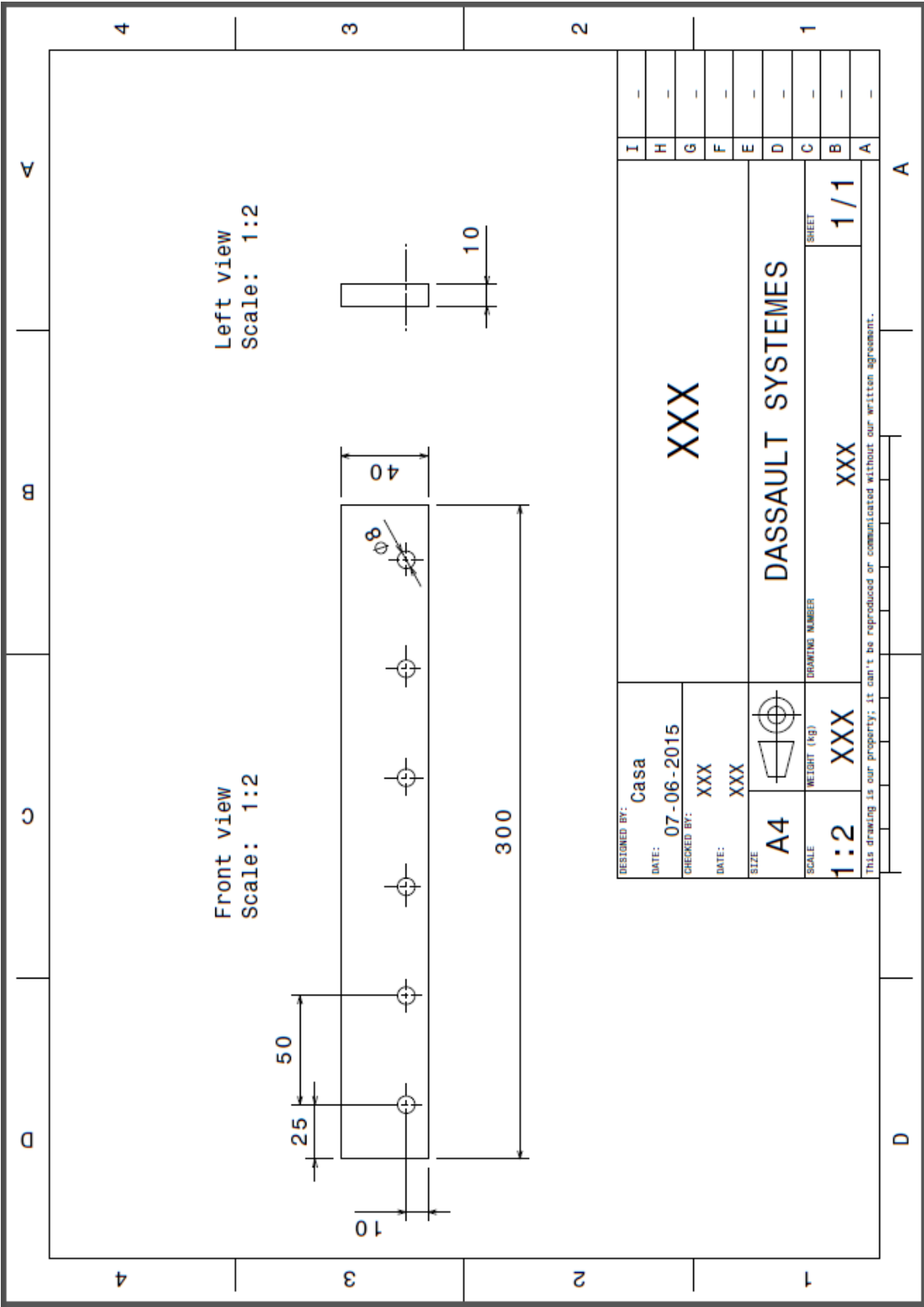
[48] MSPC – Informações técnicas. Disponível em: http://www.mspc.eng.br/mecn/fric_120.shtml [Data da consulta: 20/10/2015]

Anexos

Anexo A - Desenho da base da mesa de fixação



Anexo B – Desenho das peças de aperto da mesa de fixação

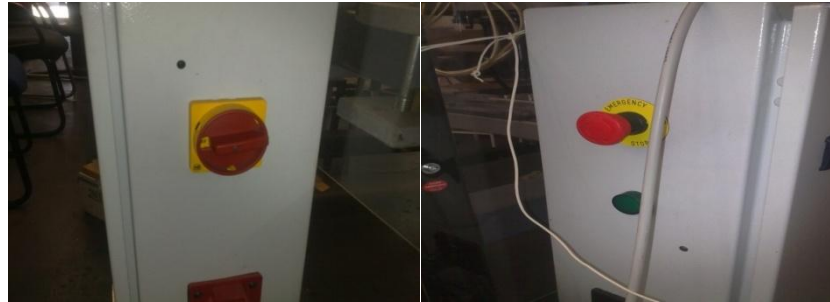


Anexo C – Guião de Manual de utilização da SPIF-A

Manual de Utilização da SPIF-A

Como fazer a conexão PC <-> SPIF-A?

- 1- Ligar o quadro eléctrico através do seccionador na parte trás do quadro. A luz verde acende.



- 2- Ligar o Pc e ligar o XPc (Botão Azul). Ambos os monitores devem dar imagem! As imagens abaixo, mostram o botão onde se liga o XPc e o que deve aparecer no monitor do XPc.



- 3- Abrir válvula da bomba (Cinzenta) da central hidráulica.



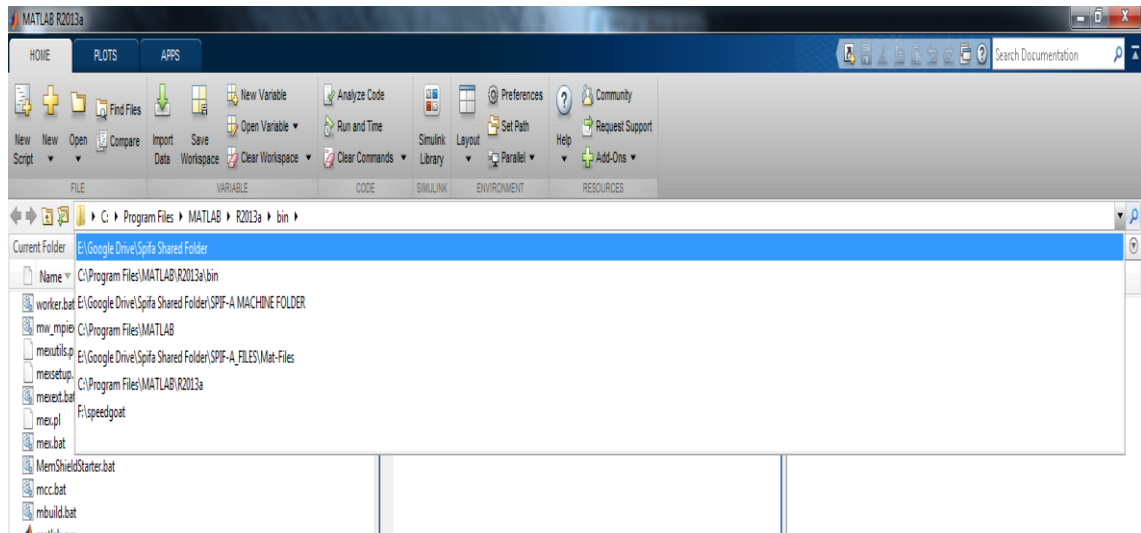
- 4- Abrir o software Matlab.



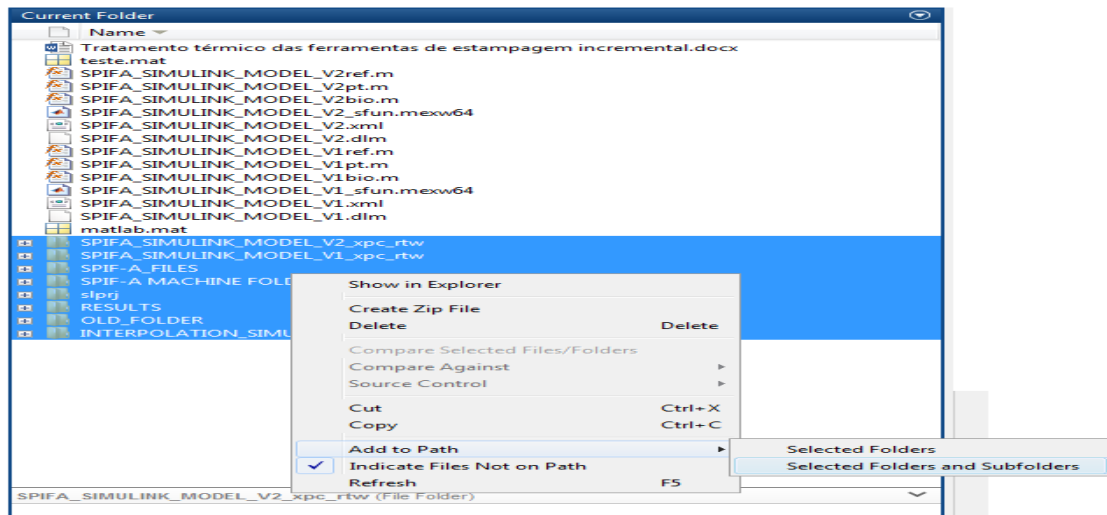
4.1- Desligar a sincronização do googledrive/dropbox para evitar erros de dados no simulink.



5- Definir o diretório de trabalho do Matlab: “E:\Google Drive\Spifa Shared Folder”.



6- Selecionar todas as pastas presentes no “Current Folder” com o botão direito do rato e fazer “add to path” e “select folders and subfolders”.

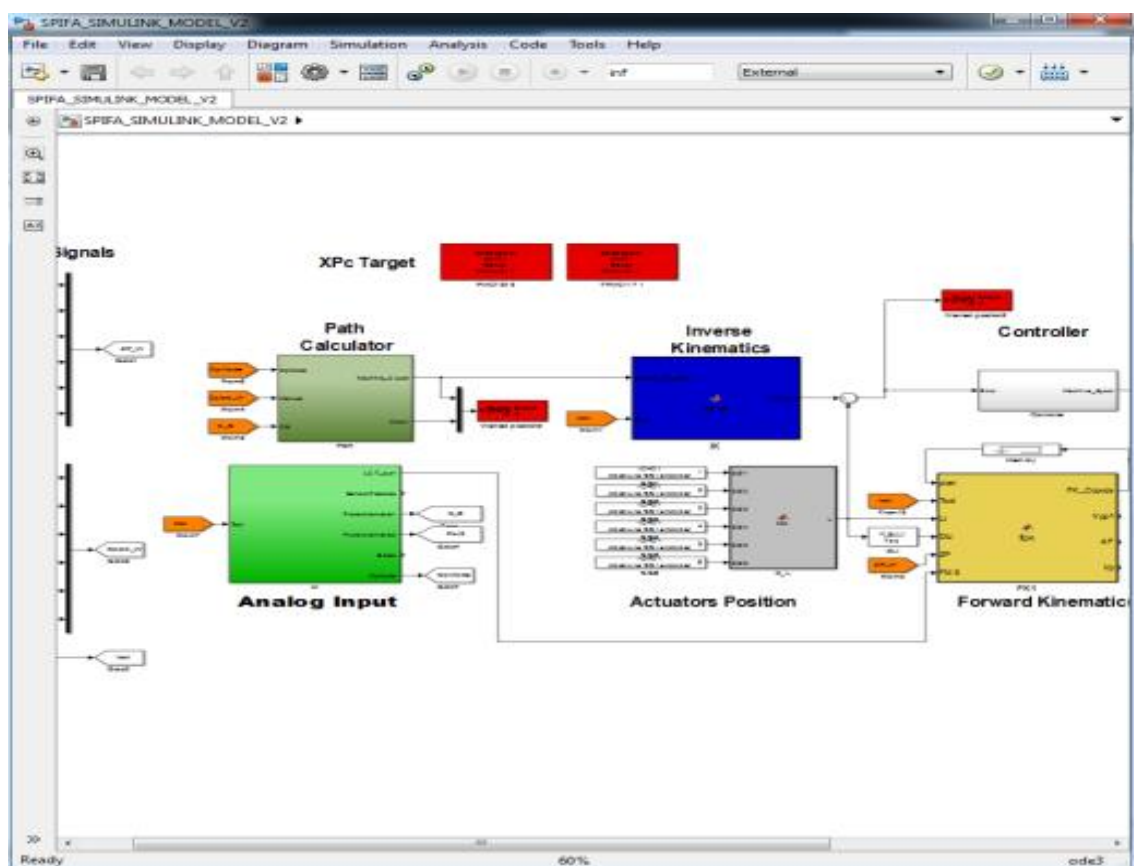
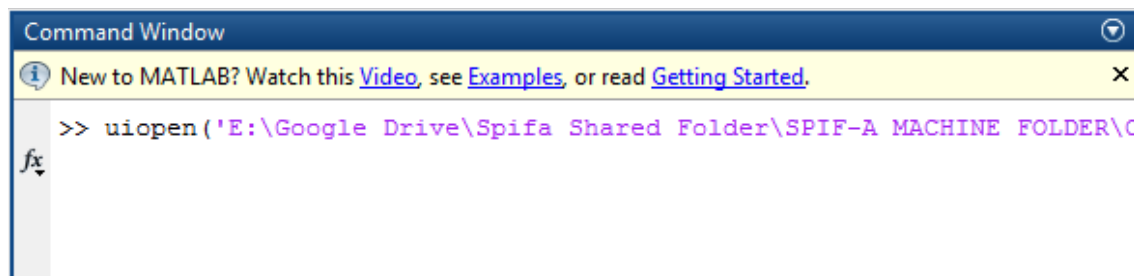


7- Abrir ficheiro do Simulink: Expandir Pasta +: SPIF-A MACHINE FOLDER - CONTROLLER: SPIFA_SIMULINK_MODEL_V2.mdl

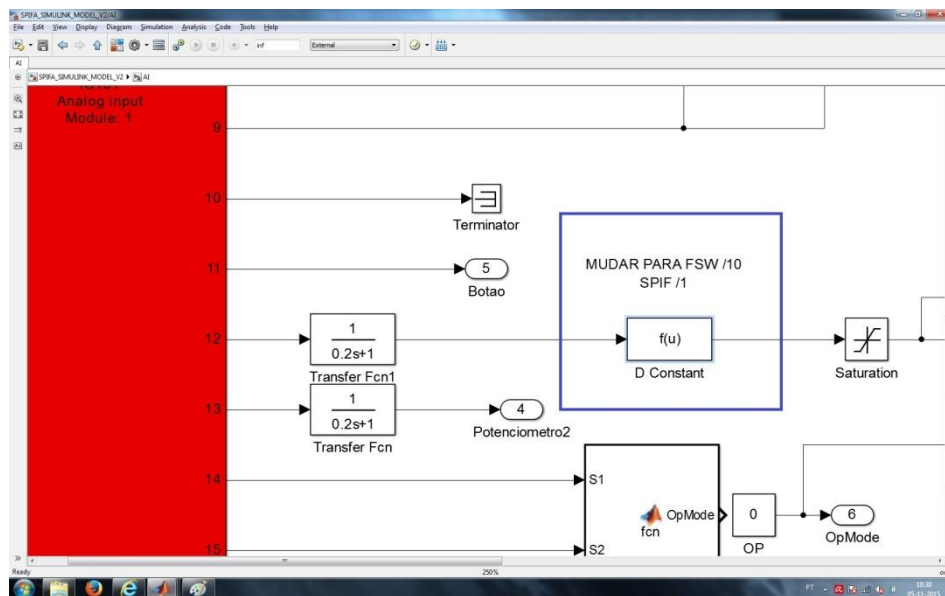
Ou

Transcrever diretamente na linha de comandos do Matlab o seguinte código: `uiopen('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACHINE FOLDER\CONTROLLER\SPIFA_SIMULINK_MODEL_V2.mdl',1).`

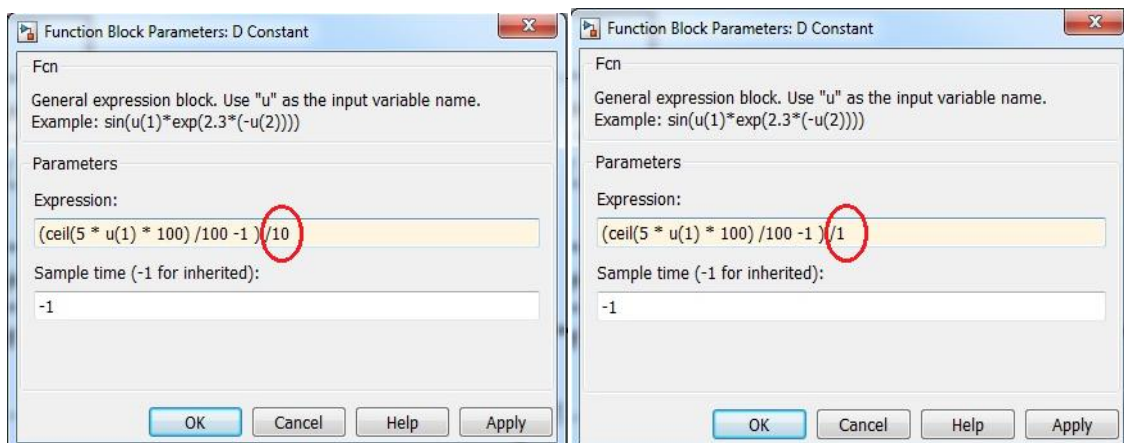
Tem de abrir uma janela com a 2ª imagem mais a baixo!



É importante controlar a velocidade de avanço. Os ensaios de soldadura por FSW são mais lentos que os ensaios de estampagem. Para se conseguir ter um melhor controlo da velocidade de avanço torna-se necessário redefinir uma variável de ganho. Para se proceder à alteração, na janela representada acima, deve-se clicar em “Analog Input” (rectângulo verde mais claro). Abre uma janela como ilustrado em baixo. Em seguida, clicar em “f(u)”.



Em seguida abre uma nova janela como representado em baixo. Devemos colocar a dividir por 10 se quisermos realizar soldadura ou a dividir por 1 se pretendemos fazer estampagem incremental.

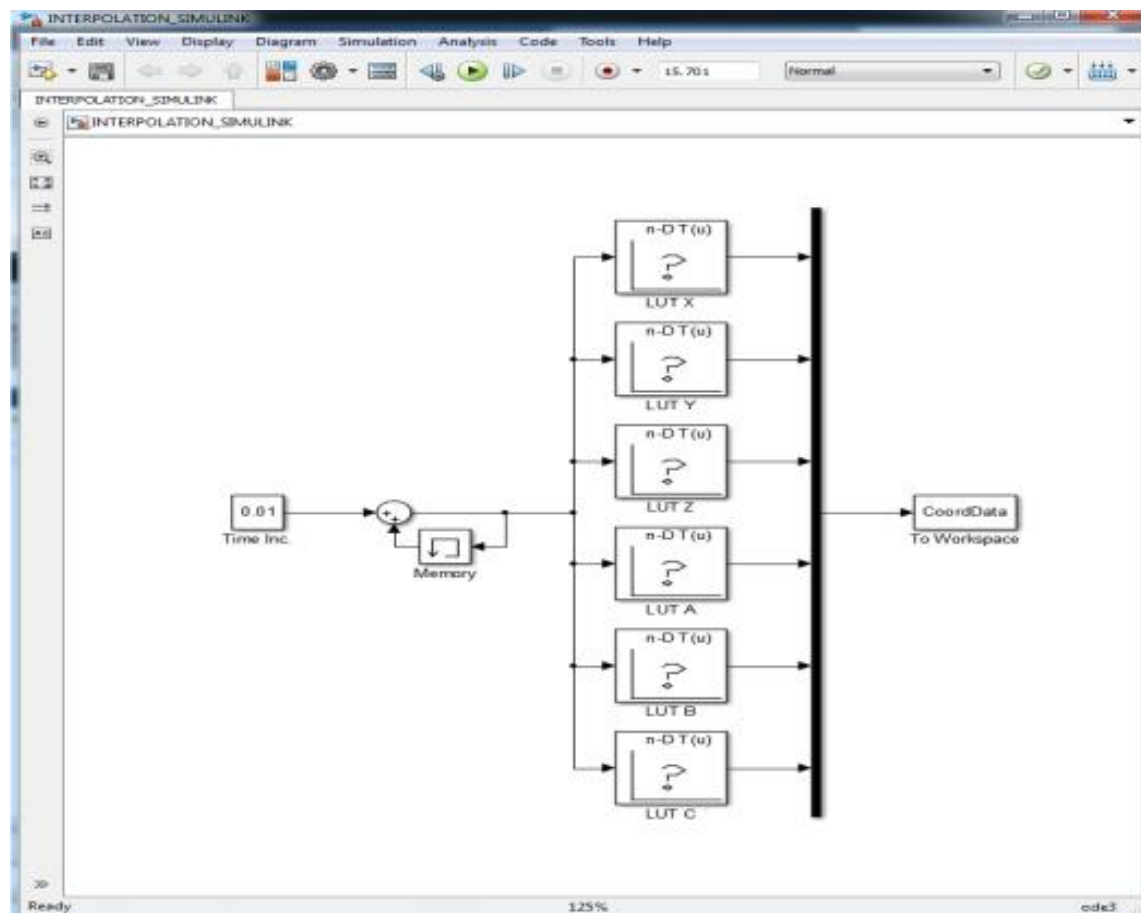
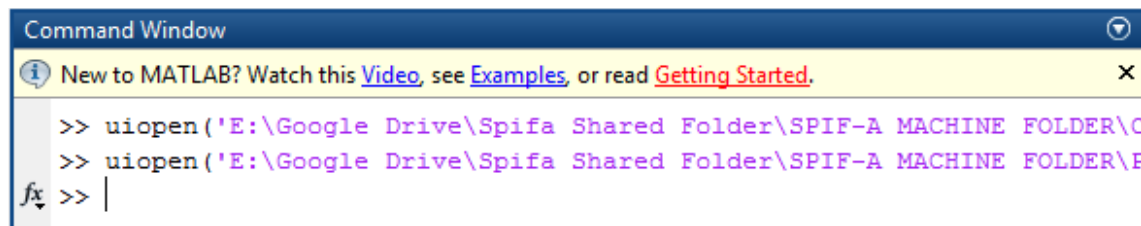


8- Abrir ficheiro do simulink interpolação: Expandir Pasta +: SPIF-A MACHINE FOLDER - PRE-PROCESSOR INTERPOLATION: INTERPOLATION_SIMULINK.mdl

Ou

Transcrever diretamente na linha de comandos do Matlab o seguinte código: `uiopen('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACHINE FOLDER\PRE-PROCESSOR INTERPOLATION\INTERPOLATION_SIMULINK.mdl',1)`

Tem de abrir uma janela com a 2ª imagem mais a baixo!



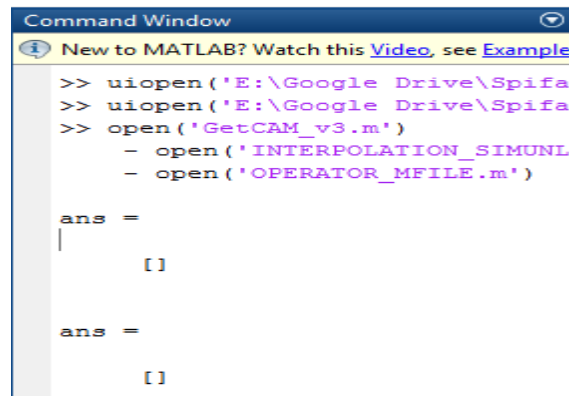
9- Abrir os seguintes ficheiros .m (Colocar diretamente na linha de comandos do Matlab os seguintes códigos).

```
open('GetCAM_v3.m')
```

```
open('INTERPOLATION_SIMUNLINK_MFILE.m')
```

```
open('OPERATOR_MFILE.m')
```

Tem de abrir uma janela com a 2ª imagem mais a baixo!



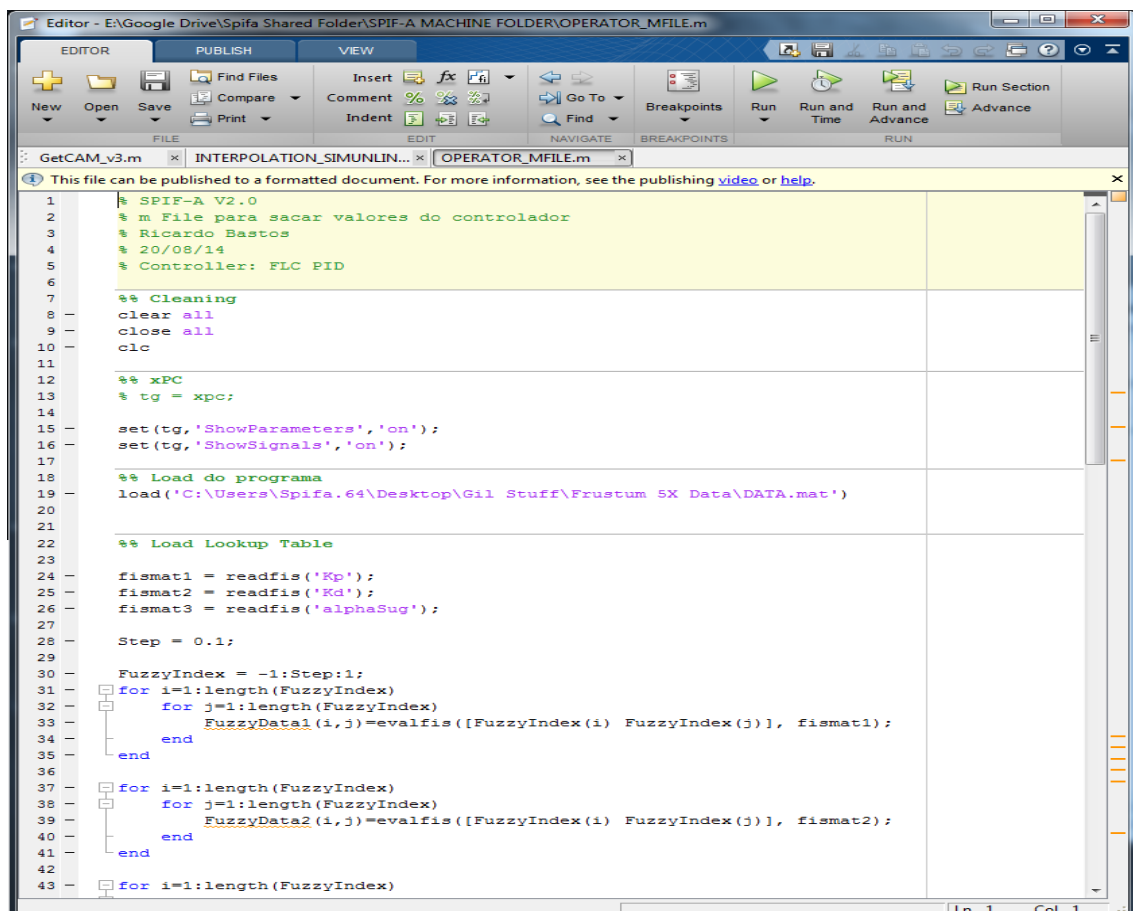
```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples

>> uiopen('E:\Google Drive\Spifa
>> uiopen('E:\Google Drive\Spifa
>> open('GetCAM_v3.m')
    - open('INTERPOLATION_SIMUNL
    - open('OPERATOR_MFILE.m')

ans =
    []

ans =
    []
    
```



```

Editor - E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACHINE FOLDER\OPERATOR_MFILE.m
FILE EDIT NAVIGATE BREAKPOINTS RUN
New Open Save Find Files Insert Comment % Go To Breakpoints Run Run and Run and Run Section
Compare Print Indent Indent Find Breakpoints Run Run and Run and Run and Advance
Advance

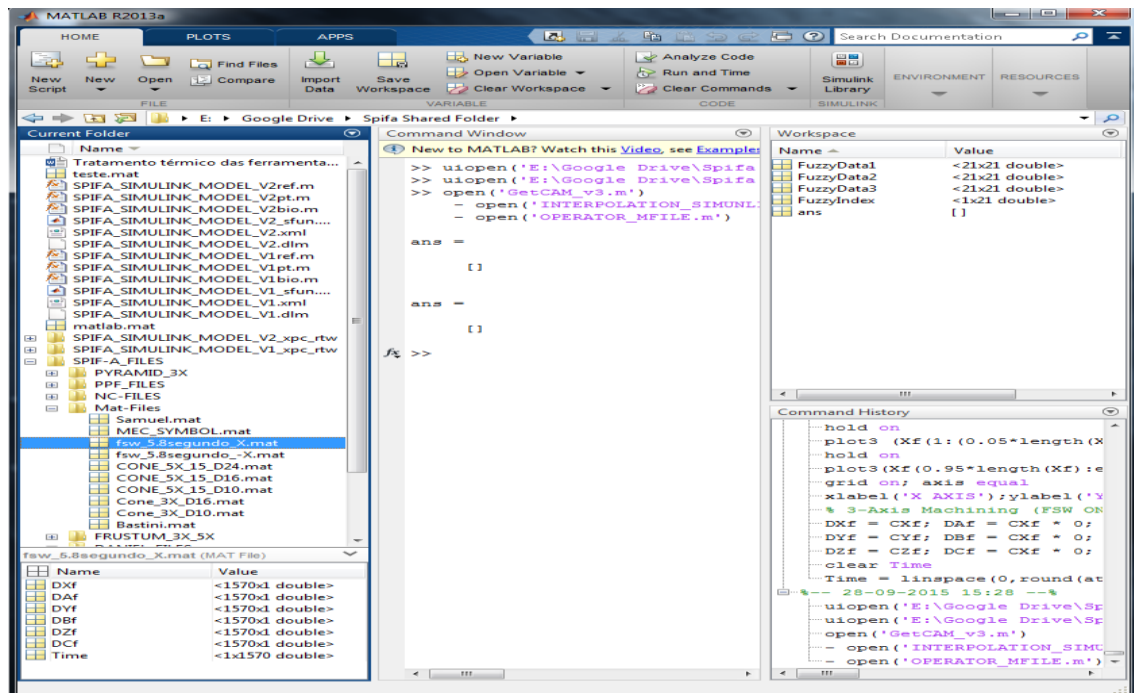
This file can be published to a formatted document. For more information, see the publishing video or help.

1 % SPIF-A V2.0
2 % m File para sacar valores do controlador
3 % Ricardo Bastos
4 % 20/08/14
5 % Controller: FLC PID
6
7 %% Cleaning
8 clear all
9 close all
10 clc
11
12 %% xPC
13 tg = xpc;
14
15 set(tg, 'ShowParameters', 'on');
16 set(tg, 'ShowSignals', 'on');
17
18 %% Load do programa
19 load('C:\Users\Spifa.64\Desktop\Gil Stuff\Frustum 5X Data\DATA.mat')
20
21
22 %% Load Lookup Table
23
24 fismat1 = readfis('Kp');
25 fismat2 = readfis('Kd');
26 fismat3 = readfis('alphaSug');
27
28 Step = 0.1;
29
30 FuzzyIndex = -1:Step:1;
31 for i=1:length(FuzzyIndex)
32     for j=1:length(FuzzyIndex)
33         FuzzyData1(i,j)=evalfis([FuzzyIndex(i) FuzzyIndex(j)], fismat1);
34     end
35 end
36
37 for i=1:length(FuzzyIndex)
38     for j=1:length(FuzzyIndex)
39         FuzzyData2(i,j)=evalfis([FuzzyIndex(i) FuzzyIndex(j)], fismat2);
40     end
41 end
42
43 for i=1:length(FuzzyIndex)
    
```

10- Criar o ficheiro .mat que contem as coordenadas para a máquina (caso não saiba criar os ficheiros .mat, consultar o guião “criar ficheiros .mat”). Este ficheiro depois de criado deve ser colocado no endereço em baixo indicado. Se o ficheiro já estiver criado, certifique-se de que se encontra no directório em baixo descrito e ignore este passo.

- E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A_FILES\Mat-Files

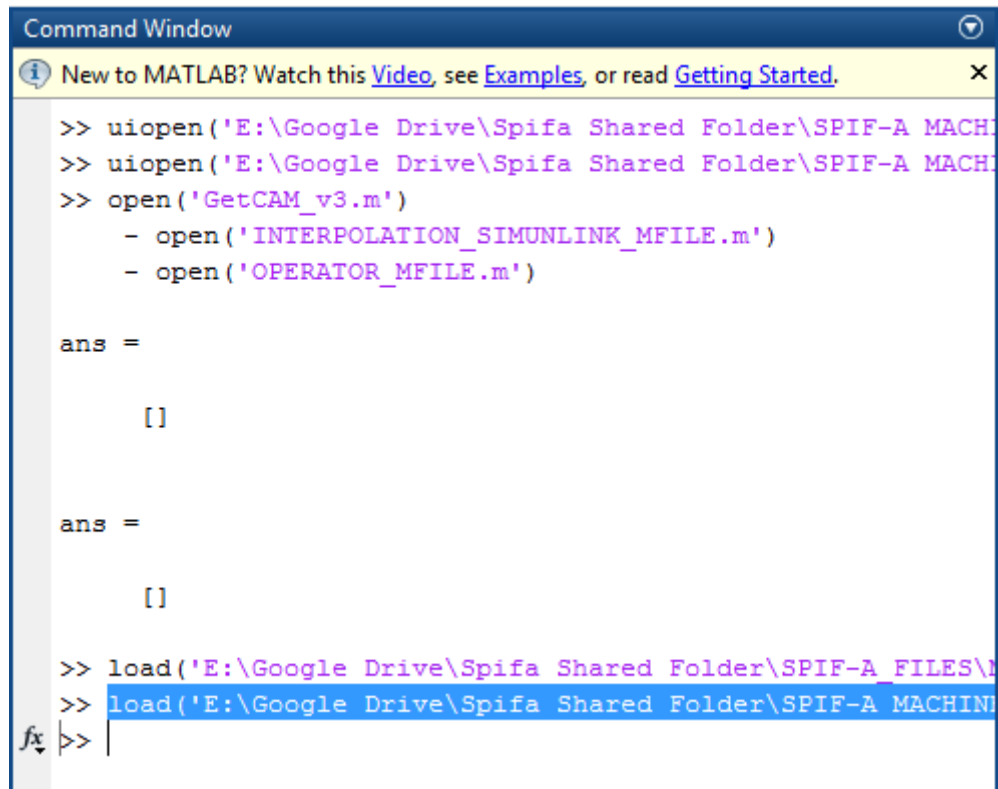
11- Carregar o ficheiro .mat pretendido que está na pasta E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A_FILES\Mat-Files



Nota: os ficheiros .mat já têm contidos todos os movimentos que a ferramenta vai fazer, constituem portanto, o programa que o utilizador quer realizar.

12- Carregar o ficheiro .mat que contem os dados do controlador para o simulink. Basta transcrever diretamente para a linha de comandos do Matlab o seguinte código:

```
load('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACHINE  
FOLDER\CONTROLLER\CONTROLLER_PARAMETERS.mat')
```



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.
>> uiopen('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACHINE')
>> uiopen('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACHINE')
>> open('GetCAM_v3.m')
    - open('INTERPOLATION_SIMUNLINK_MFILE.m')
    - open('OPERATOR_MFILE.m')

ans =

    []

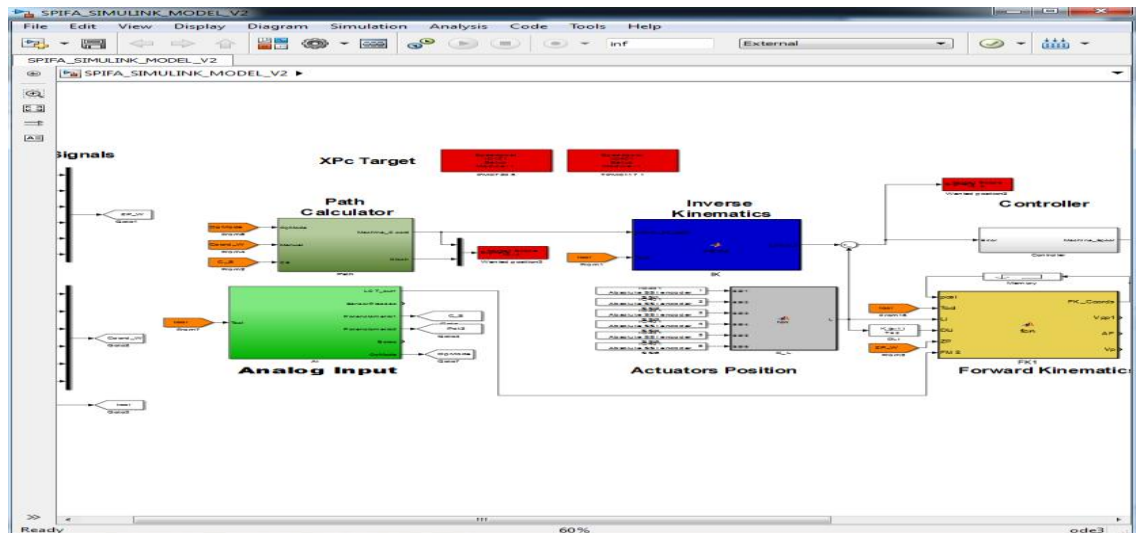
ans =

    []

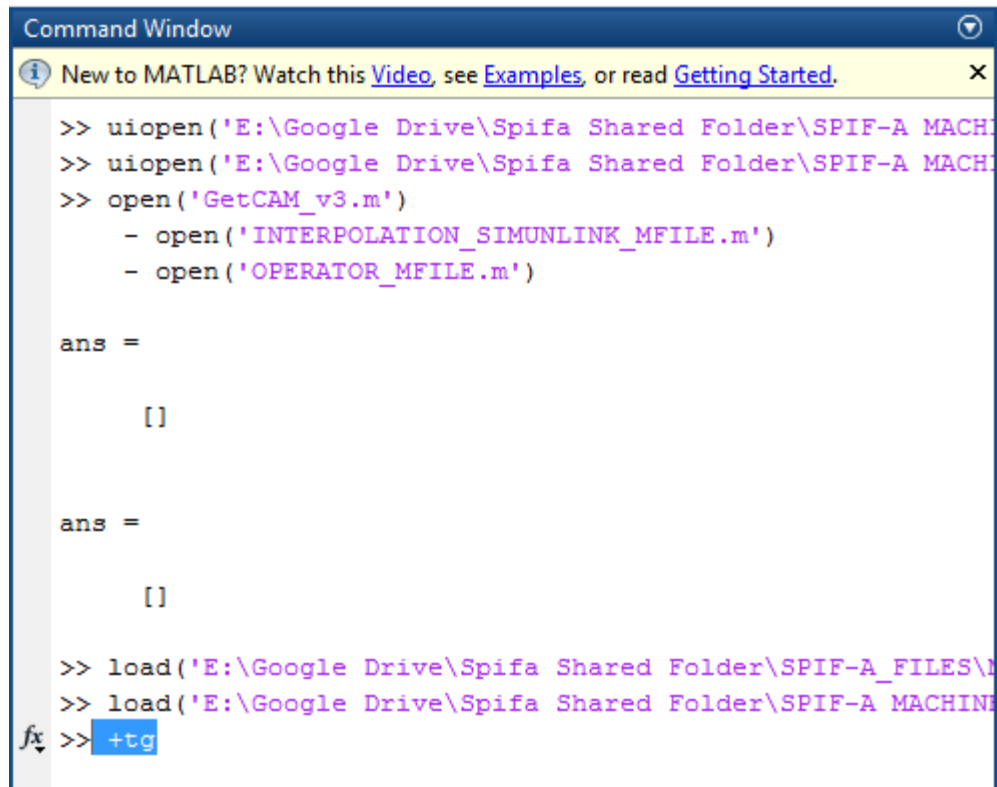
>> load('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A FILES\')
>> load('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACHINE')
fx >> |
```

13- Fazer CTRL+B na janela do simulink (a mais colorida) e esperar que no ecrã do xpc apareçam os 4 quadrados pretos (Fazer build do simulink).

Tem de abrir uma janela com a 2ª imagem mais a baixo!



14- Na janela de comandos do matlab, fazer "+tg", isto liga o XPC. Os valores que aparecem no monitor do XPC, devem alterar-se em baixa escala. Isto significa que o XPC está operacional e que o PC e a SPIF-A estão conectados.



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.
>> uiopen('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACH...')
>> uiopen('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACH...')
>> open('GetCAM_v3.m')
    - open('INTERPOLATION_SIMUNLINK_MFILE.m')
    - open('OPERATOR_MFILE.m')

ans =

    []

ans =

    []

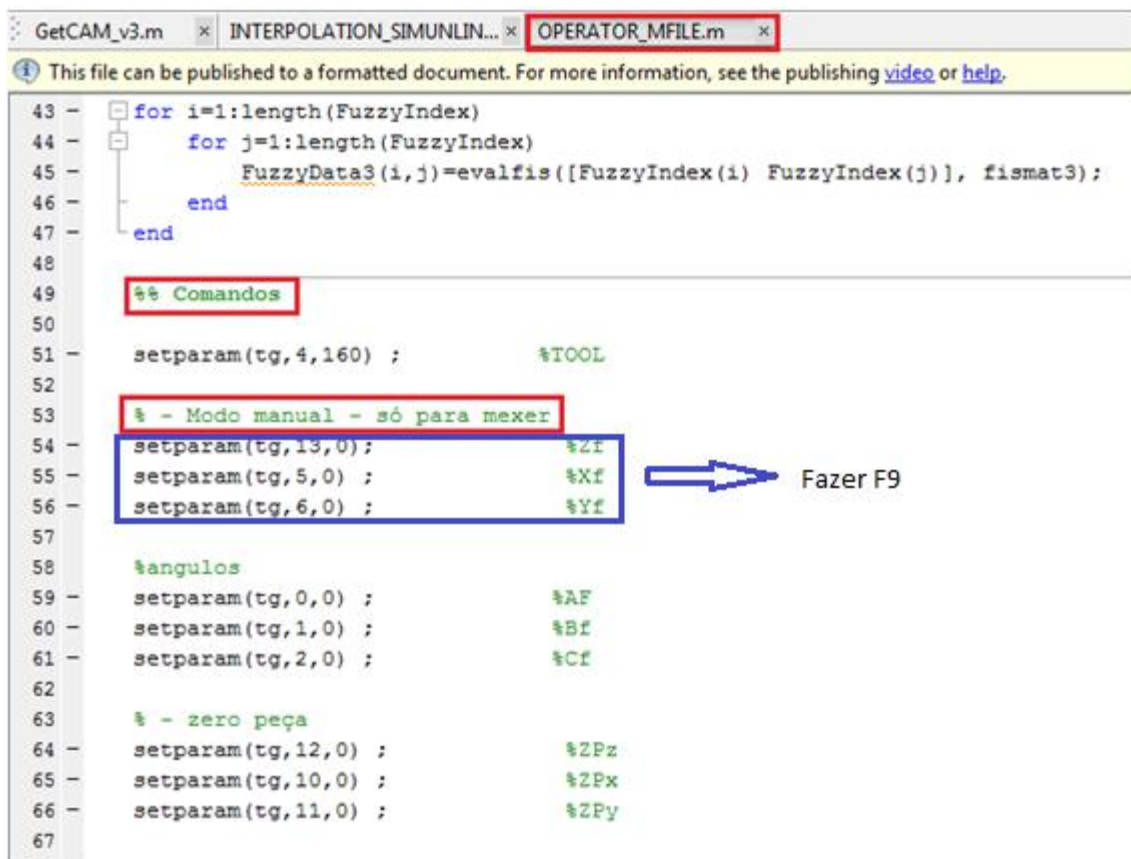
>> load('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A_FILES\...')
>> load('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACHINE...')
fx >> +tg
```

Como operar/mexer a SPIF-A?

15- No matlab ir para o ficheiro .m de nome "OPERATOR_MFILE".

15.1- Ir para a secção "comandos".

15.2- Na parte que diz “Modo Manual – só para mexer” colocar a zeros, como mostra em baixo e correr apenas essas 3 linhas. (selecionar e fazer f9).



```

43 - for i=1:length(FuzzyIndex)
44 -     for j=1:length(FuzzyIndex)
45 -         FuzzyData3(i,j)=evalfis([FuzzyIndex(i) FuzzyIndex(j)], fismat3);
46 -     end
47 - end
48
49 - %% Comandos
50
51 - setparam(tg,4,160); %TOOL
52
53 - % - Modo manual - só para mexer
54 - setparam(tg,13,0); %Zf
55 - setparam(tg,5,0); %Xf
56 - setparam(tg,6,0); %Yf
57
58 - %angulos
59 - setparam(tg,0,0); %Af
60 - setparam(tg,1,0); %Bf
61 - setparam(tg,2,0); %Cf
62
63 - % - zero peça
64 - setparam(tg,12,0); %ZPz
65 - setparam(tg,10,0); %ZPx
66 - setparam(tg,11,0); %ZPy
67

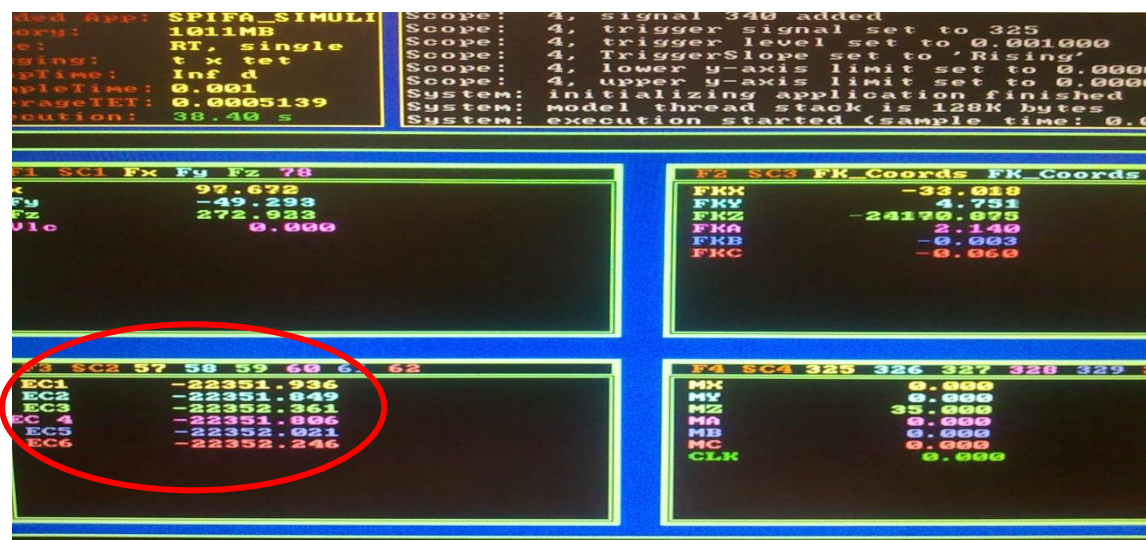
```

Este passo serve para que, ao ligar a spif-a, todos os cilindros estejam recolhidos.

16- Ligar ambos botões de emergência (no quadro eléctrico e consola). Só aqui é que a SPIF-A fica a funcionar).



Nota: Só se liga a máquina com erros negativos dos cilindros para o cilindros subirem! Os erros podem ser vistos no monitor do XPC, no canto inferior esquerdo.



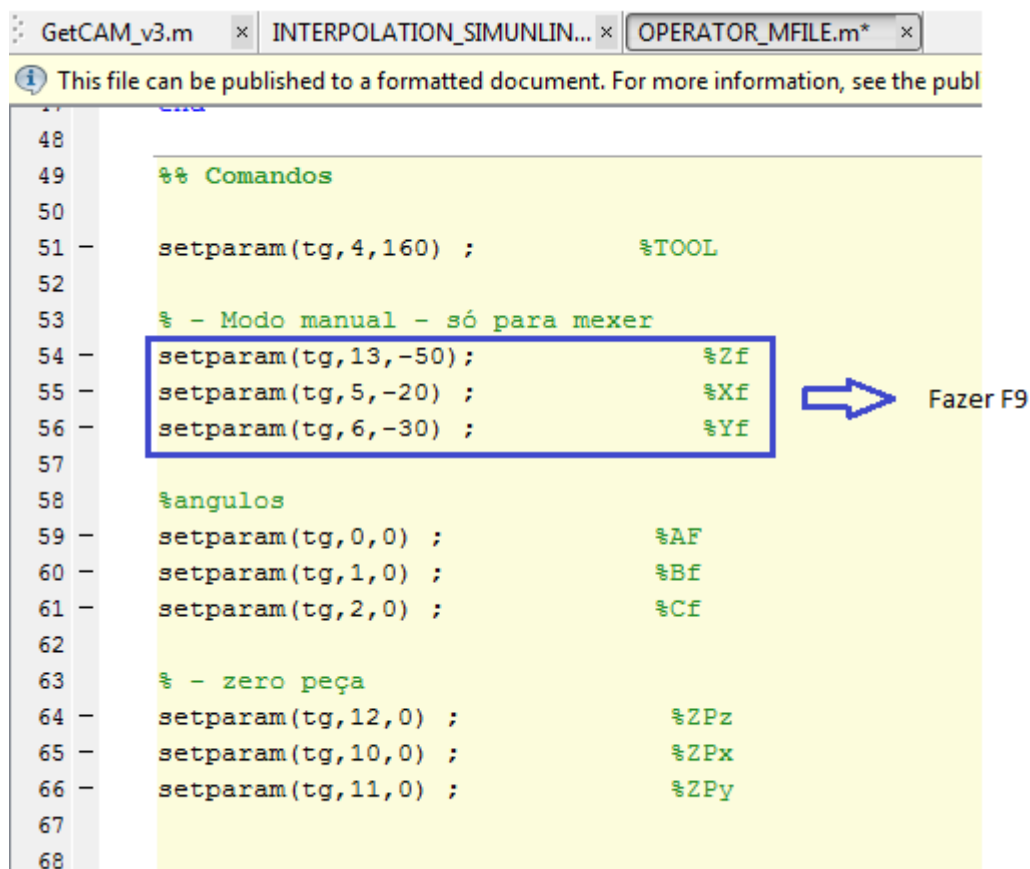
17- Fechar válvula da bomba. (Cinzenta) da central hidráulica. Fechar até a pressão atingir mais ou menos os 150bar. A central faz um ruído diferente no trabalhar, quando esta estiver ao máximo.



18 - Posicionar a máquina no local pretendido usando o matalb. (%modo Manual-só para mexer). A ponta da ferramenta deve ficar a tocar no local, onde se quer que o nosso programa se inicie. A título de exemplo, imagine-se que a posição seria Zf=-50, Xf=-20, Yf=-30.

Notas: A primeira coordenada a mexer será sempre segundo -Z para dar folga para aos cilindros, e estes se puderem movimentar posteriormente no plano xy.

As coordenadas devem ser procuradas aos poucos. Isto é, por exemplo para chegar a Z-50, deve-se ir aos poucos para evitar que a ferramenta embata com violência na peça por erros de medida. Devia fazer-se z=-20, z=-40, z=-45 e z=-50. Deste modo consegue-se perceber melhor a que distância a ferramenta se encontra da peça.



```

48
49 %% Comandos
50
51 - setparam(tg,4,160) ;           %TOOL
52
53 % - Modo manual - só para mexer
54 - setparam(tg,13,-50);          %Zf
55 - setparam(tg,5,-20) ;          %Xf
56 - setparam(tg,6,-30) ;          %Yf
57
58 %angulos
59 - setparam(tg,0,0) ;            %AF
60 - setparam(tg,1,0) ;            %Bf
61 - setparam(tg,2,0) ;            %Cf
62
63 % - zero peça
64 - setparam(tg,12,0) ;           %ZPz
65 - setparam(tg,10,0) ;           %ZPx
66 - setparam(tg,11,0) ;           %ZPy
67
68

```

Nos ensaios de soldadura pode ser necessário usar ângulo de ataque. O ângulo de ataque pode ser definido também em %%comandos, no código mostrado abaixo. O ângulo é colocado em graus e permanece constante durante o ensaio.

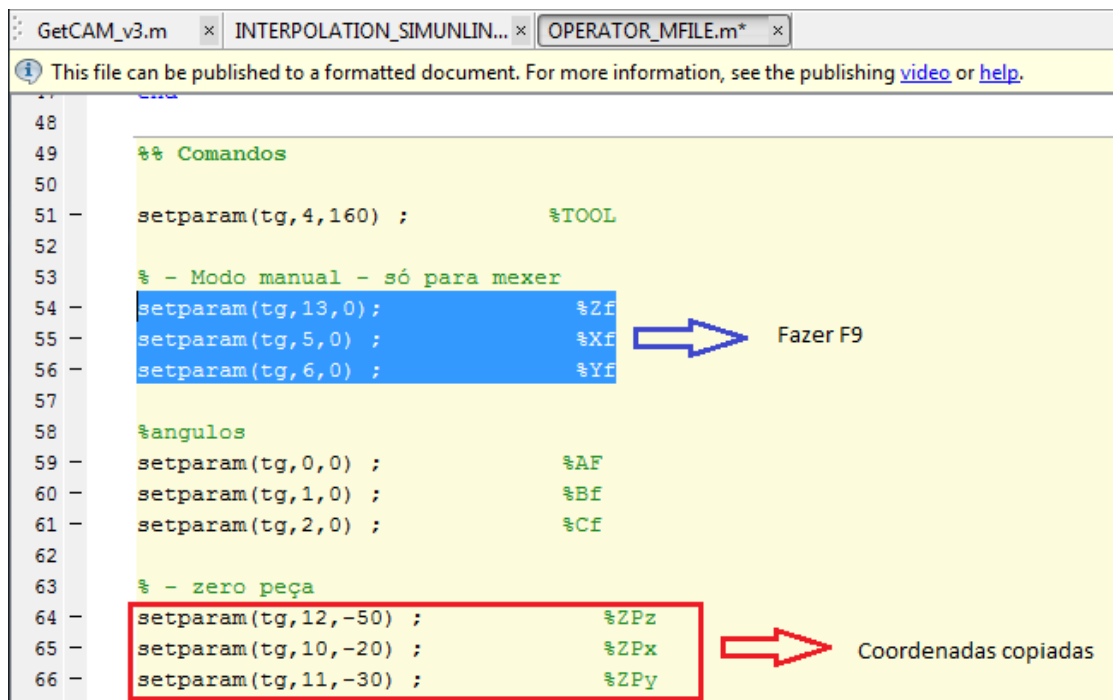
```

67
68 %angulos para auto
69 - setparam(tg,7,0) ;           %ZPA rodar em torno de y
70 - setparam(tg,8,0) ;           %ZPB rodar em torno de x
71

```

18.1- Passar as coordenadas obtidas anteriormente para % - zero peça.

18.2- Voltar a colocar o modo manual a zero e F9.

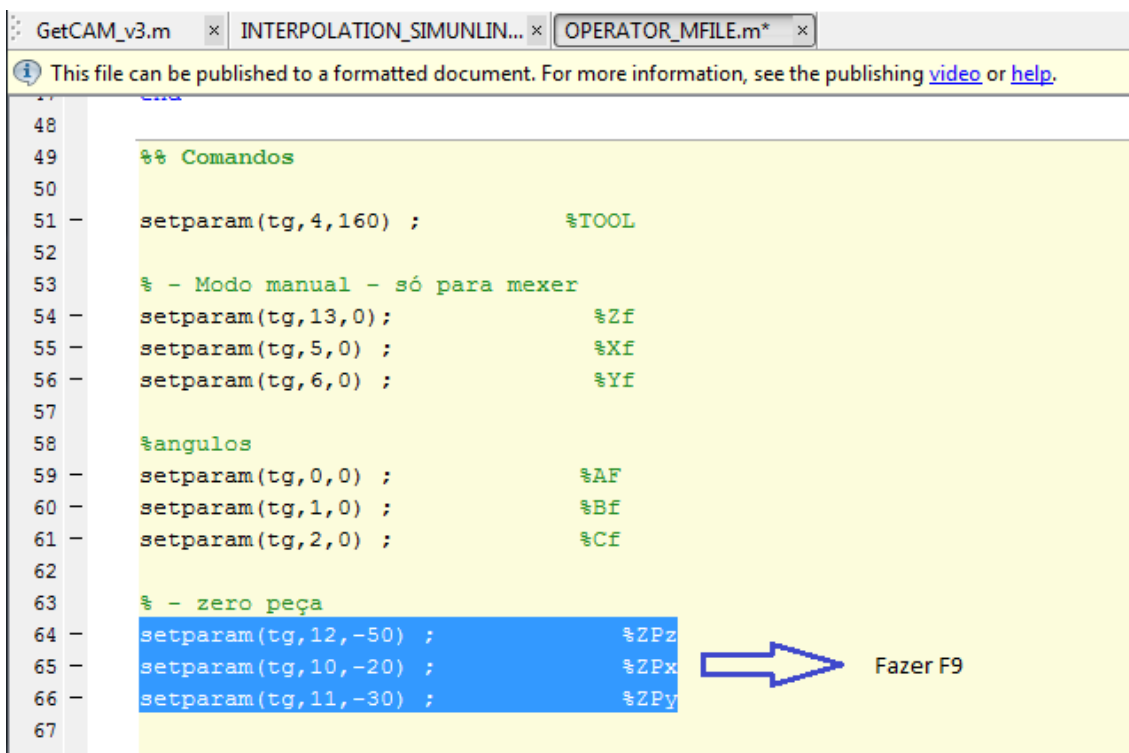


```

48
49 %% Comandos
50
51 setparam(tg,4,160) ;          %TOOL
52
53 % - Modo manual - só para mexer
54 setparam(tg,13,0) ;           %Zf
55 setparam(tg,5,0) ;           %Xf
56 setparam(tg,6,0) ;           %Yf
57
58 %angulos
59 setparam(tg,0,0) ;           %Af
60 setparam(tg,1,0) ;           %Bf
61 setparam(tg,2,0) ;           %Cf
62
63 % - zero peça
64 setparam(tg,12,-50) ;         %ZPz
65 setparam(tg,10,-20) ;         %ZPx
66 setparam(tg,11,-30) ;         %ZPy

```

18.3- F9 no %zero peça.



```

48
49 %% Comandos
50
51 setparam(tg,4,160) ;          %TOOL
52
53 % - Modo manual - só para mexer
54 setparam(tg,13,0) ;           %Zf
55 setparam(tg,5,0) ;           %Xf
56 setparam(tg,6,0) ;           %Yf
57
58 %angulos
59 setparam(tg,0,0) ;           %Af
60 setparam(tg,1,0) ;           %Bf
61 setparam(tg,2,0) ;           %Cf
62
63 % - zero peça
64 setparam(tg,12,-50) ;         %ZPz
65 setparam(tg,10,-20) ;         %ZPx
66 setparam(tg,11,-30) ;         %ZPy
67
68

```

18.4- F9 no % - Meter pre-automatico (fazer depois do zero peça!).

```

49 %% Comandos
50
51 - setparam(tg,4,160) ;          %TOOL
52
53 % - Modo manual - só para mexer
54 - setparam(tg,13,0) ;          %Zf
55 - setparam(tg,5,0) ;          %Xf
56 - setparam(tg,6,0) ;          %Yf
57
58 %angulos
59 - setparam(tg,0,0) ;          %Af
60 - setparam(tg,1,0) ;          %Bf
61 - setparam(tg,2,0) ;          %Cf
62
63 % - zero peça
64 - setparam(tg,12,-50) ;        %ZPz
65 - setparam(tg,10,-20) ;        %ZPx
66 - setparam(tg,11,-30) ;        %ZPy
67
68
69 - setparam(tg,7,-2) ;          %ZPA
70
71 % - Meter pre-automático (fazer depois do zero peça!!!!)
72 - setparam(tg,13,DZf(1)) ;     %Zf
73 - setparam(tg,5,DXf(1)) ;      %Xf
74 - setparam(tg,6,DYf(1)) ;      %Yf
75

```

➡ Fazer F9

18.5- F9 no %auto-on (Antes de virar a maquina para auto ON, rodar o potenciômetro vermelho na consola para 0 por segurança. A velocidade neste momento está a 0. Para a máquina mexer rodar o potenciômetro vermelho para a velocidade pretendida).

A Spif-a começa a fazer o programa.

```

63      % - zero peça
64 -    setparam(tg,12,-50) ;           %ZPz
65 -    setparam(tg,10,-20) ;          %ZPx
66 -    setparam(tg,11,-30) ;          %ZPy
67
68
69 -    setparam(tg,7,-2) ;             %ZPA
70
71      % - Meter pre-automatico (fazer depois do zero peça!!!!)
72 -    setparam(tg,13,DZf(1)) ;       %Zf
73 -    setparam(tg,5,DXf(1)) ;        %Xf
74 -    setparam(tg,6,DYf(1)) ;        %Yf
75
76      % Auto - on/off
77 -    setparam(tg,73,0) ;             %auto off
78 -    setparam(tg,73,1) ;             %auto on
79

```

➡ Fazer F9




18.6- No final, os cilindros vão recolher totalmente e o erro vai aumentar.

Rodar potenciômetro vermelho para 0 (ERRO PÁRA) e F9 em %auto off. Erro baixo.

```

62
63 % - zero peça
64 - setparam(tg,12,-50) ;           %ZPz
65 - setparam(tg,10,-20) ;          %ZPx
66 - setparam(tg,11,-30) ;          %ZPy
67
68
69 - setparam(tg,7,-2) ;             %ZPA
70
71 % - Meter pre-automatico (fazer depois do zero peça!!!!)
72 - setparam(tg,13,DZf(1)) ;       %Zf
73 - setparam(tg,5,DXf(1)) ;        %Xf
74 - setparam(tg,6,DYf(1)) ;        %Yf
75
76 % Auto - on/off
77 - setparam(tg,73,0) ;             %auto off
78 - setparam(tg,73,1) ;             %auto on
79
80 - setparam(tg,13,-100) ;          %Zf

```


 Fazer F9

18.7- Voltar a colocar tudo a zeros no %zero peça e F9

```

49 %% Comandos
50
51 - setparam(tg,4,160) ;           %TOOL
52
53 % - Modo manual - só para mexer
54 - setparam(tg,13,0) ;            %Zf
55 - setparam(tg,5,0) ;             %Xf
56 - setparam(tg,6,0) ;             %Yf
57
58 %angulos
59 - setparam(tg,0,0) ;             %AF
60 - setparam(tg,1,0) ;             %Bf
61 - setparam(tg,2,0) ;             %Cf
62
63 % - zero peça
64 - setparam(tg,12,0) ;            %ZPz
65 - setparam(tg,10,0) ;            %ZPx
66 - setparam(tg,11,0) ;            %ZPy
67
68

```

 Fazer F9


18.8- Colocar tudo a zeros no % - Modo manual - só para mexer e F9

Erro deve ficar a zero

```

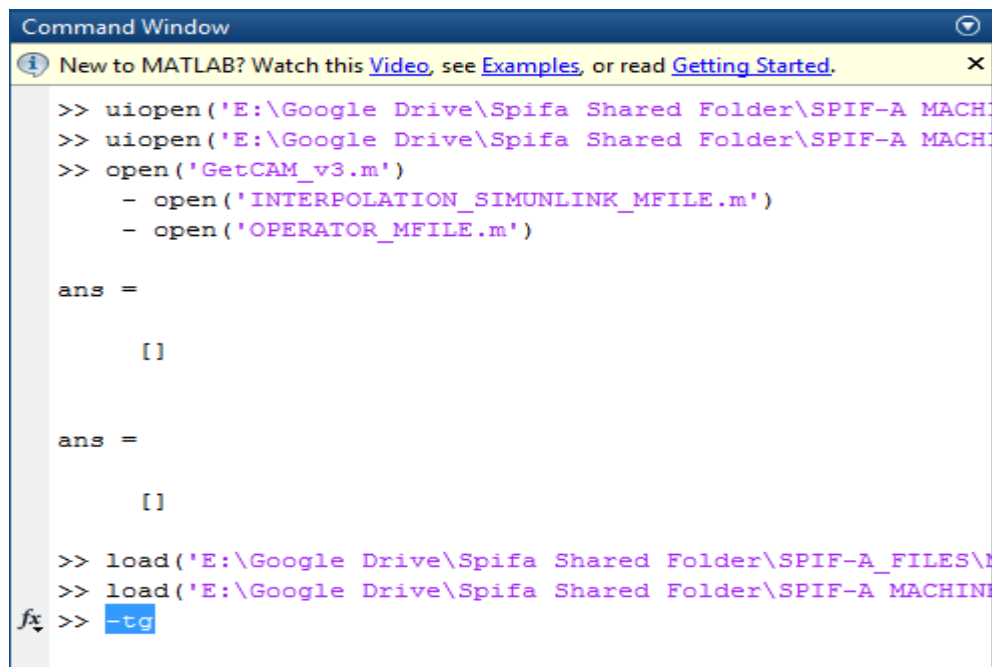
49 %% Comandos
50
51 - setparam(tg,4,160) ;           %TOOL
52
53 % - Modo manual - só para mexer
54 - setparam(tg,13,0) ;           %Zf
55 - setparam(tg,5,0) ;           %Xf
56 - setparam(tg,6,0) ;           %Yf
57
58 %angulos
59 - setparam(tg,0,0) ;           %Af
60 - setparam(tg,1,0) ;           %Bf
61 - setparam(tg,2,0) ;           %Cf
62
63 % - zero peça
64 - setparam(tg,12,0) ;          %ZPz
65 - setparam(tg,10,0) ;          %ZPx
66 - setparam(tg,11,0) ;          %ZPy
67

```



Para recomençar, voltar ao ponto 18 e repetir o procedimento!

19- Se pretender desligar deve fazer “-tg” na linha de comandos do matlab, desligar ambos os botões de emergência e voltar a abrir a válvula na central hidráulica.



```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.
>> uiopen('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACH
>> uiopen('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACH
>> open('GetCAM_v3.m')
    - open('INTERPOLATION_SIMUNLINK_MFILE.m')
    - open('OPERATOR_MFILE.m')

ans =

    []

ans =

    []

>> load('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A_FILES\I
>> load('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACHIN
fx >> -tg

```

20- Fechar todos os programas e desligar todos os equipamentos.

Anexo D – Guião de Manual de criação de ficheiros .mat

Manual de criação de ficheiros .mat

Os ficheiros .mat são ficheiros específicos do Matlab. Estes ficheiros vão conter sempre 7 variáveis! São elas DAf, DBf, DCf, DXf, DYf, DZf e time e são as variáveis que a SPIF-A precisa para executar os programas.

Uma nota importante é que se as variáveis DAf, DBf, DCf, DXf, DYf, DZf tiverem uma dimensão genérica de [X,Y] a variável time terá de ter uma dimensão [Y,X].

Nota: As variáveis DAf, DBf, DCf, DXf, DYf, DZf transformam os caminhos pretendidos do programa em “ponto a ponto”. É uma subdivisão dos trajetos que a ferramenta tem de percorrer. A variável time é a que vai fazer com que se consiga variar a velocidade

1- O primeiro passo é criar um ficheiro .txt com todo o código G para realizar o ensaio pretendido. Em baixo está descrito , por exemplo, o código G para realizar os ensaios de soldadura.

Nota: Tem de começar sempre com N111 e terminar com M30

Exemplo: N111 G0 X0 Y0 Z25

N120 G0 X0 Y0 Z25

N130 G0 X100 Y0 Z25

N140 G0 X100 Y0 Z-5.8

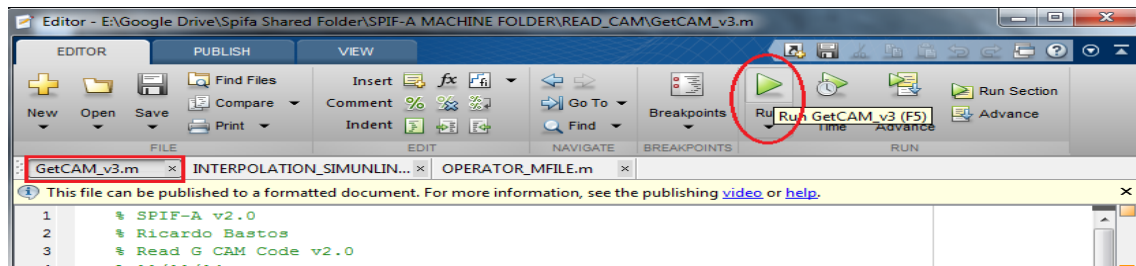
N150 G0 X0 Y0 Z-5.8

N160 G0 X0 Y0 Z25

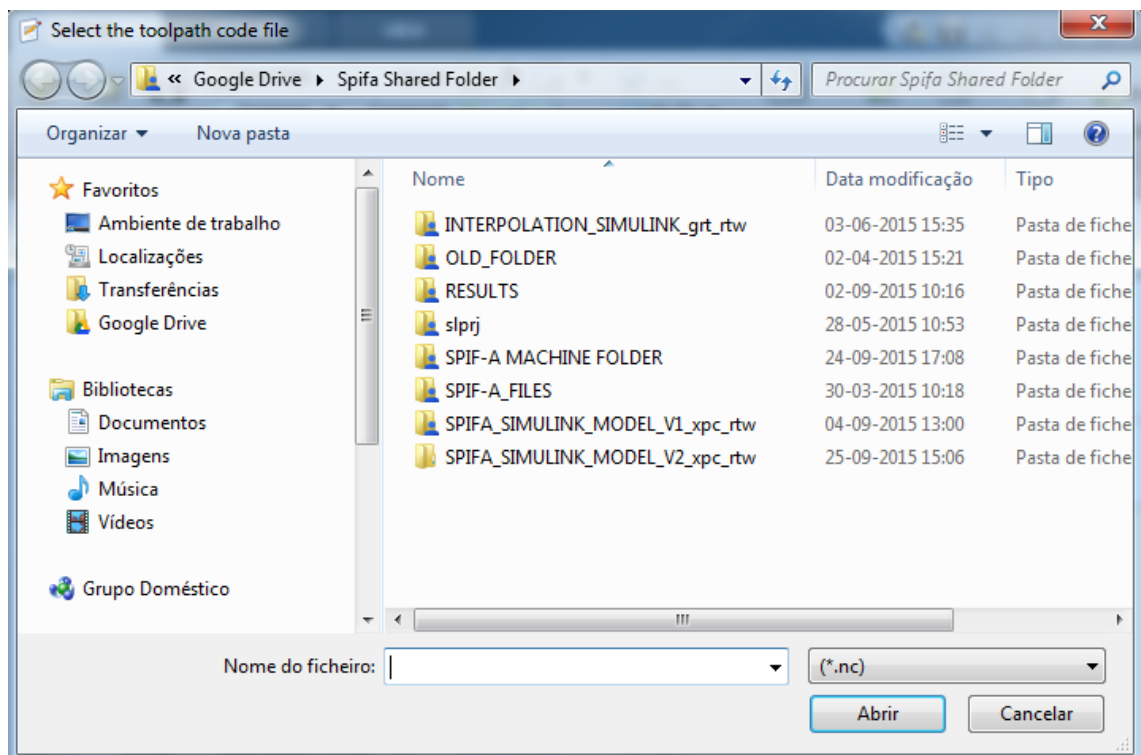
N170 G0 X0 Y0 Z25

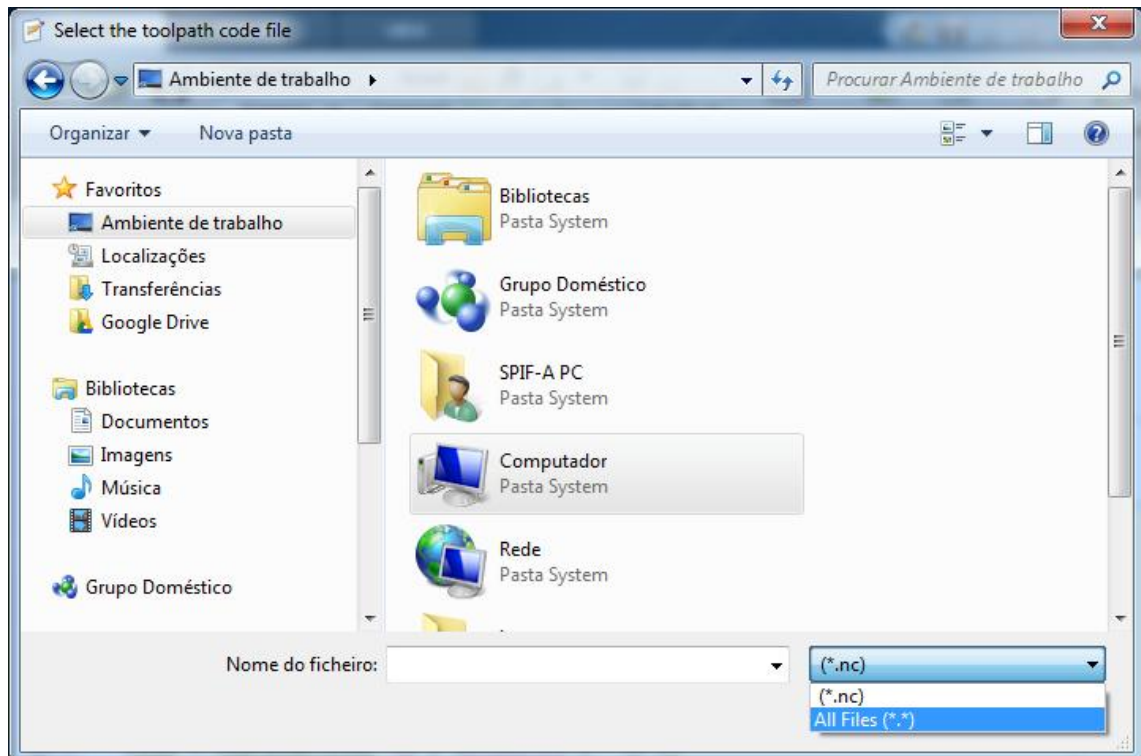
M30

2- Após criar o ficheiro .txt que se pretende, é necessário aceder ao ficheiro .m GetCAM_v3.m e correr todo o ficheiro .m, clicando no botão “RUN” localizado na barra “Editor” do matlab.

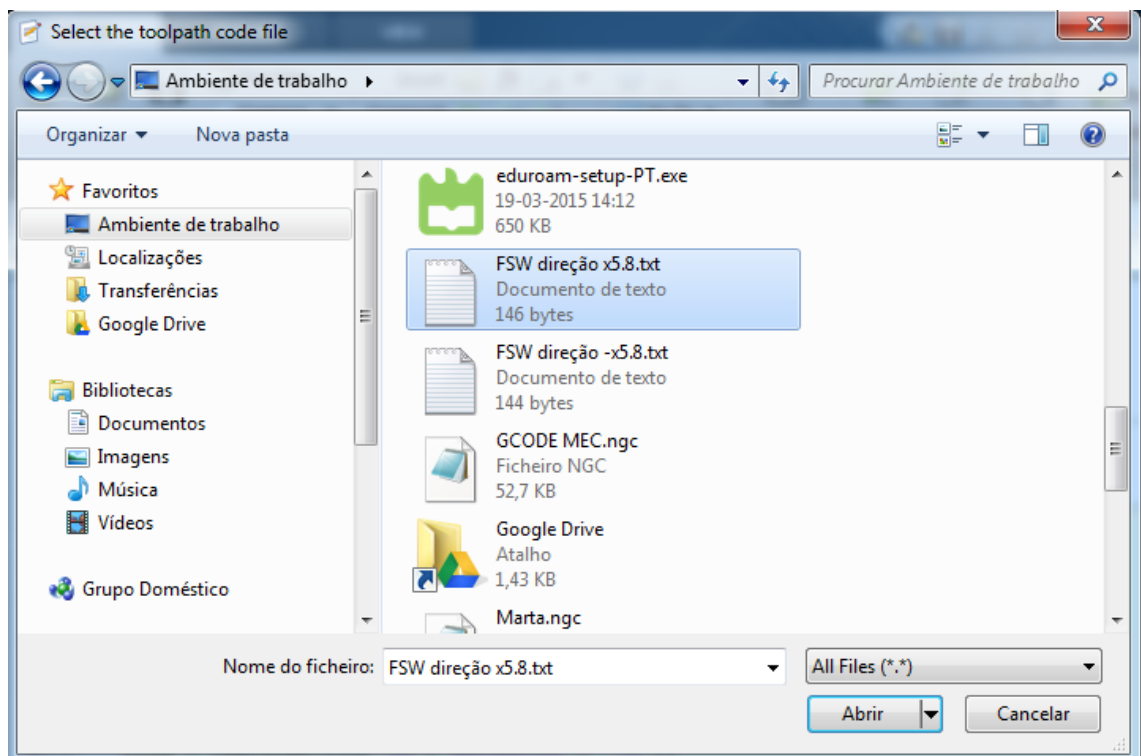


2.1- Em seguida, vai abrir um janela para escolher o ficheiro .txt pretendido. Ir buscar o ficheiro .txt ao directório de onde este se encontra. É Preciso seleccionar “All Files (*.*)”

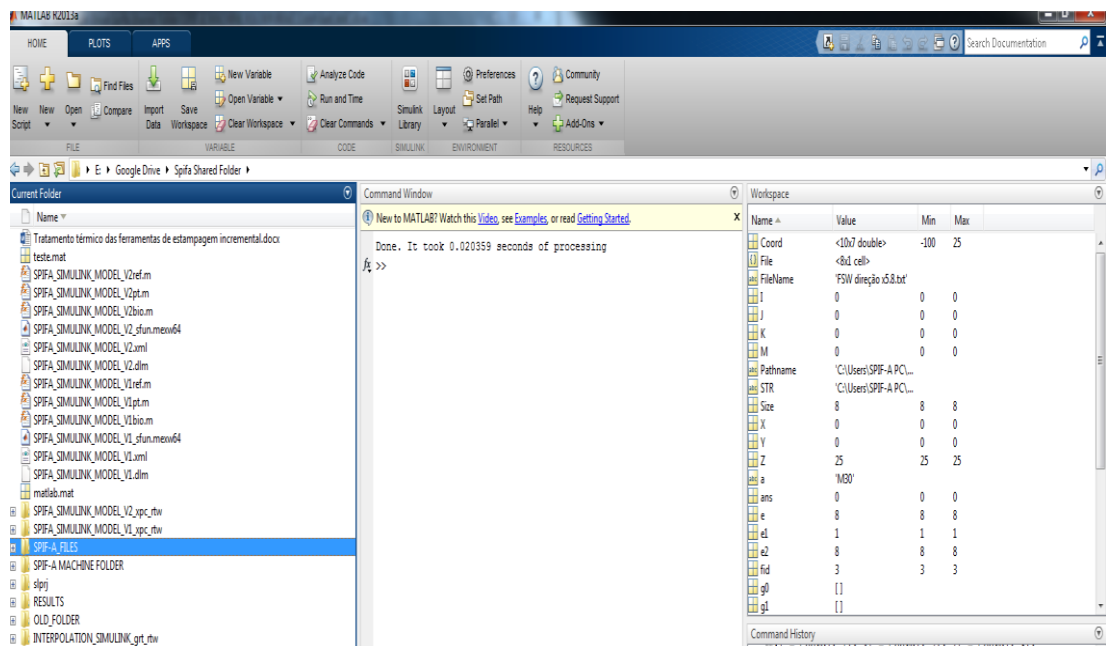




2.2- Escolher o ficheiro .txt que se pretende realizar, e clicar “Abrir”



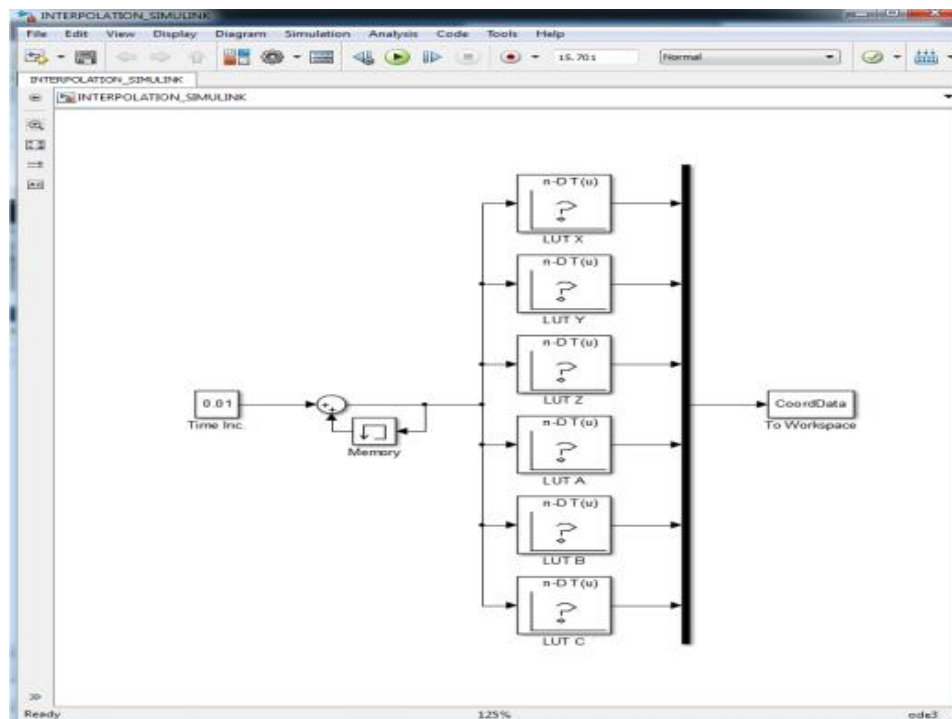
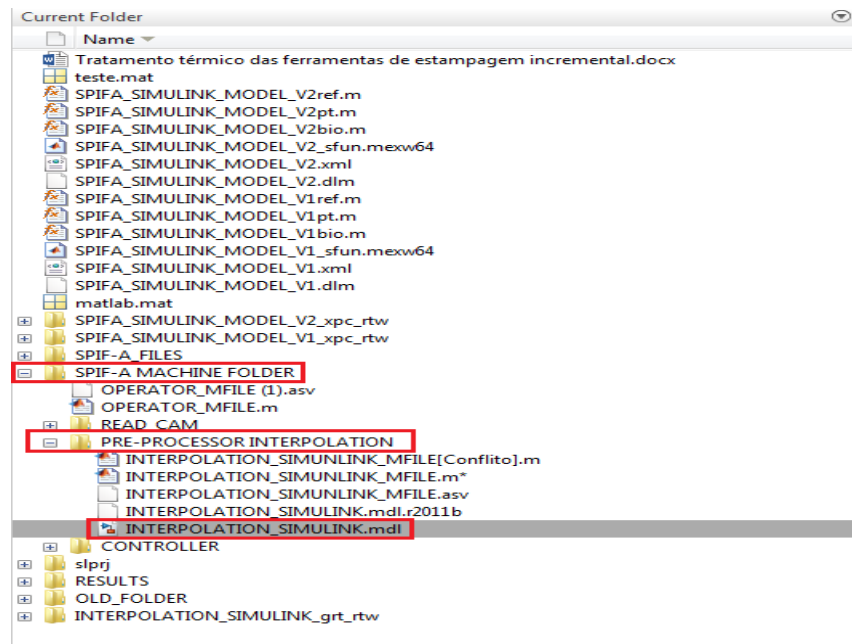
2.3- Depois de clicar em “abrir” a janela principal do matlab deve apresentar o seguinte aspeto:



3- Abrir simulink: Spif-A ,machine folder - pre-processor interpolation-interpolation_simulink_md ou transcrevendo diretamente na linha de comandos o seguinte código:

uiopen('E:\Google Drive\Spifa Shared Folder\SPIF-A MACHINE FOLDER\PRE-PROCESSOR INTERPOLATION\INTERPOLATION_SIMULINK.mdl',1)

Tem de abrir uma janela com a 2ª imagem mais a baixo!



4- Ir para o ficheiro .m Interpolation_simulink_mfile.m em %%time data e seleccionar as linhas abaixo descritas e fazer F9.

```
Xf = Coord(:,1); Yf = Coord(:,2); Zf = Coord(:,3);
Af = Coord(:,4); Bf = Coord(:,5); Cf = Coord(:,6);
```

```

GetCAM_v3.m x INTERPOLATION_SIMUNLIN... x OPERATOR_MFILE.m x
This file can be published to a formatted document. For more information, see the publishing video or help.

1
2 %%
3 clear all
4 clc
5 close all
6
7 %% Time Data
8
9 % Converter
10 Xf = Coord(:,1); Yf = Coord(:,2); Zf = Coord(:,3);
11 Af = Coord(:,4); Bf = Coord(:,5); Cf = Coord(:,6);
12
13 % Scale
14 Scale = 1;
15 Xf = Xf*Scale;
16 Yf = Yf*Scale;
17 Zf = Zf*Scale;
18

```

Fazer F9

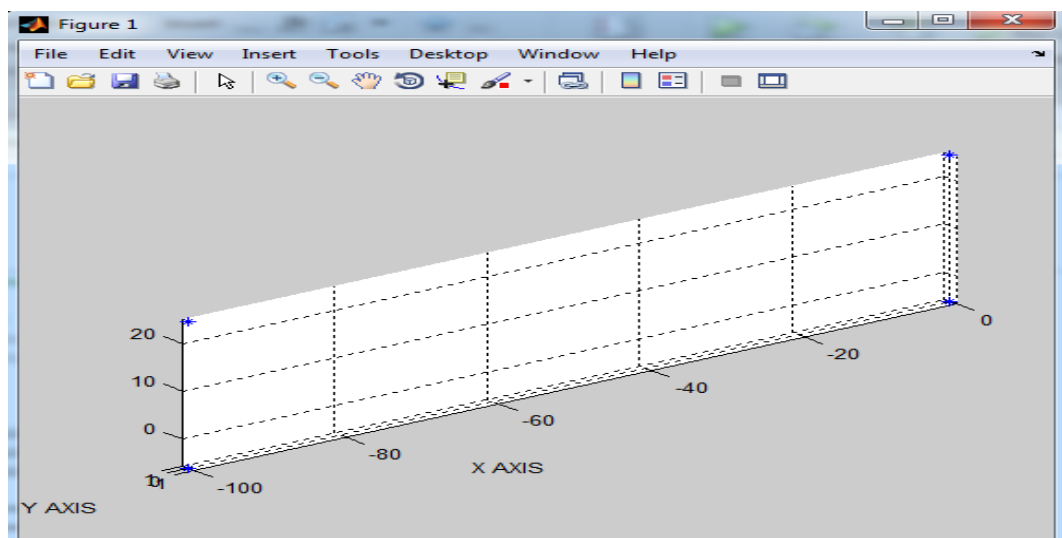
5- Para verificar se as coordenadas do nosso programa estão como pretendido, ir a Interpolation_simulink_mfile.m em %%plot raw data e fazer F9

```

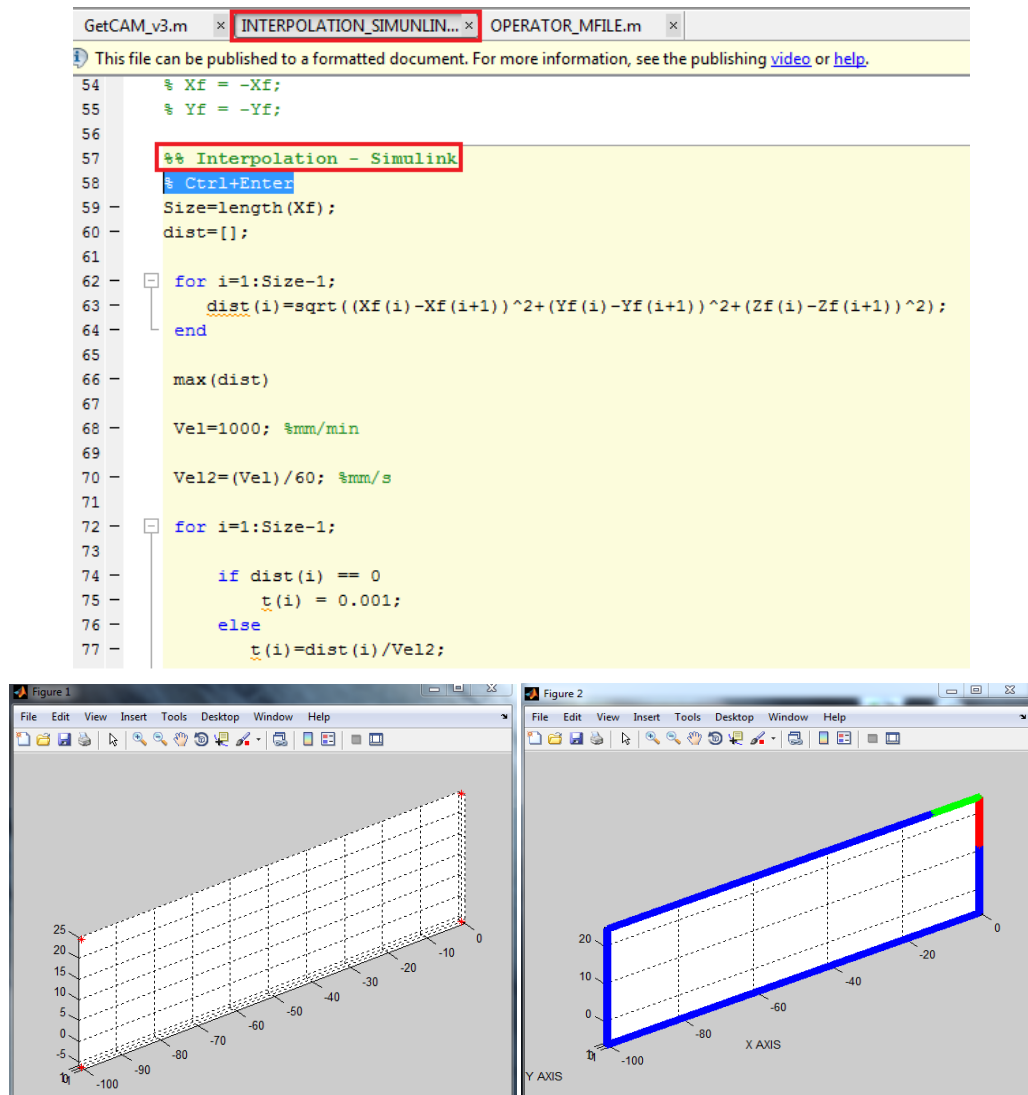
23 %% Plot Raw Data
24
25 figure(1);
26 plot3(Xf,Yf,Zf,'*b');
27 hold on
28 plot3(Xf(1:(0.05*length(Xf))),Yf(1:(0.05*length(Yf))),Zf(1:(0.05*length(Zf))),'*g');
29 hold on
30 plot3(Xf(0.95*length(Xf):end),Yf(0.95*length(Yf):end),Zf(0.95*length(Zf):end),'*r');
31 grid on; axis equal
32 xlabel('X AXIS');ylabel('Y AXIS');
33

```

Fazer F9





6- Em seguida, ir a Interpolation_simulink_mfile.m em %% Interpolation - Simulink e fazer Control+Enter. No final devem aparecer os plots do programa pretendido. Deve verificar-se sempre se o programa está realmente sem erros, e se é o que se pretende verdadeiramente.



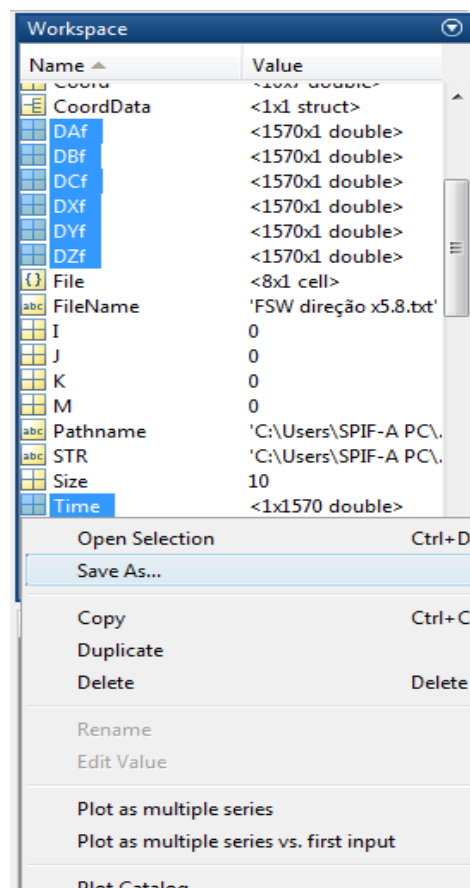
Nota: A verde representa a parte inicial do programa ou seja o inicio, a azul é a parte intermédia e a vermelho é a parte final do programa.

7- Definir com quantos eixos a máquina vai trabalhar. Ir para a Interpolation_simulink_mfile.m na linha de código nº 132.

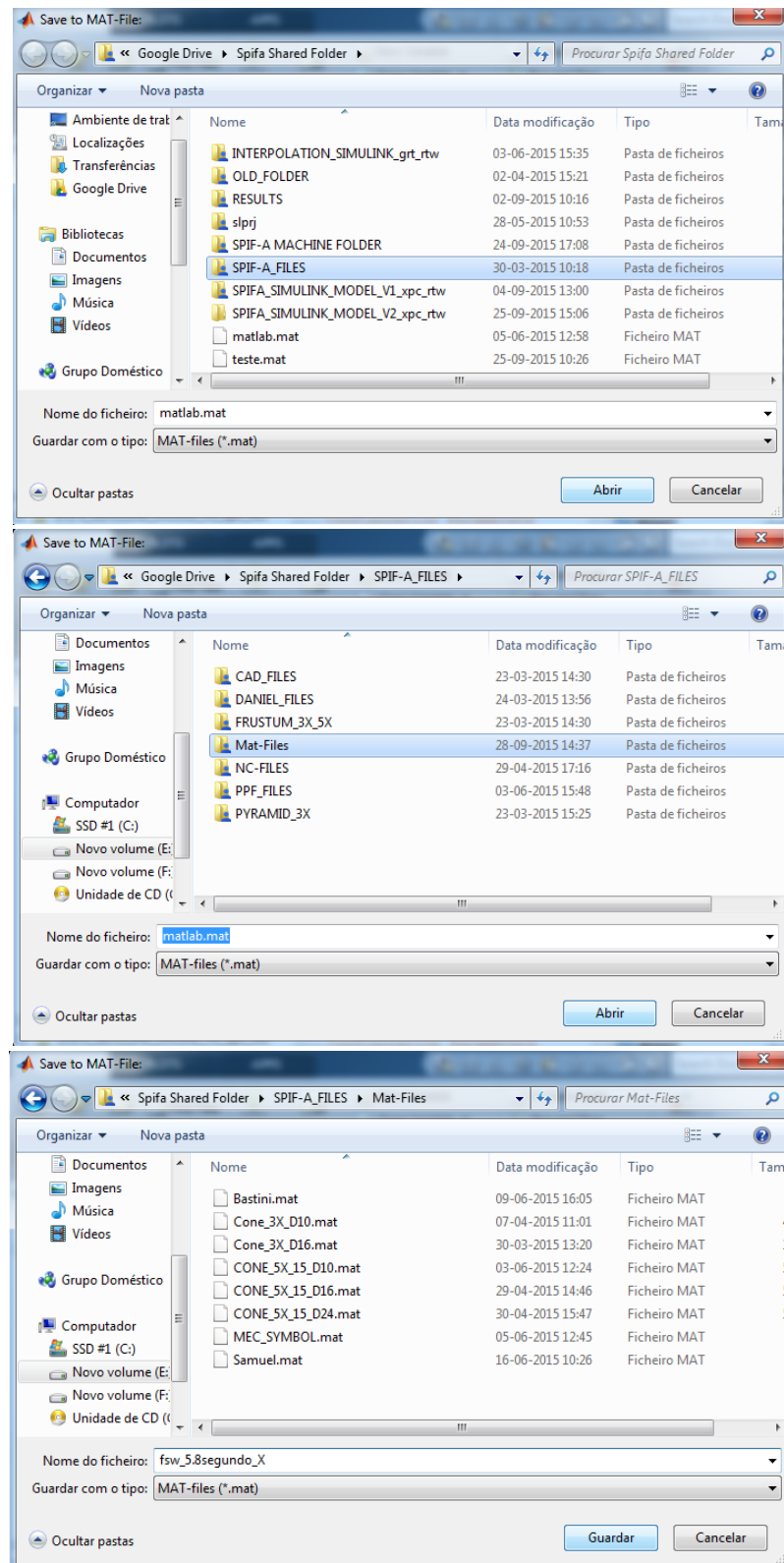
Esta parte depende da complexidade do programa pretendido. Neste caso em especial da soldadura, o programa é simples e apenas são necessários 3 eixos. Se forem necessários 5 eixos deve seleccionar-se a opção de usar 5 eixos.

<pre> 131 132 133 134 % 3-Axis Machining (FSW ONLY 3-AXIS) 135 DXf = CXf; DAf = CXf * 0; 136 DYf = CYf; DBf = CXf * 0; 137 DZf = CZf; DCf = CXf * 0; 138 clear Time 139 Time = linspace(0,round(at(end)),length(CXf)); 140 141 142 % 5-Axis Machining 143 DXf = CXf; DAf = CAf; 144 DYf = CYf; DBf = CBf; 145 DZf = CZf; DCf = CCf * 0; 146 clear Time 147 Time = linspace(0,round(at(end)),length(CXf)); 148 </pre>		<p>Selecionar esta parte se o programa precisar de 3 eixos</p> <p>Fazer F9</p>
	<p>Selecionar esta parte se o programa precisar de 5 eixos</p> <p>Fazer F9</p>	

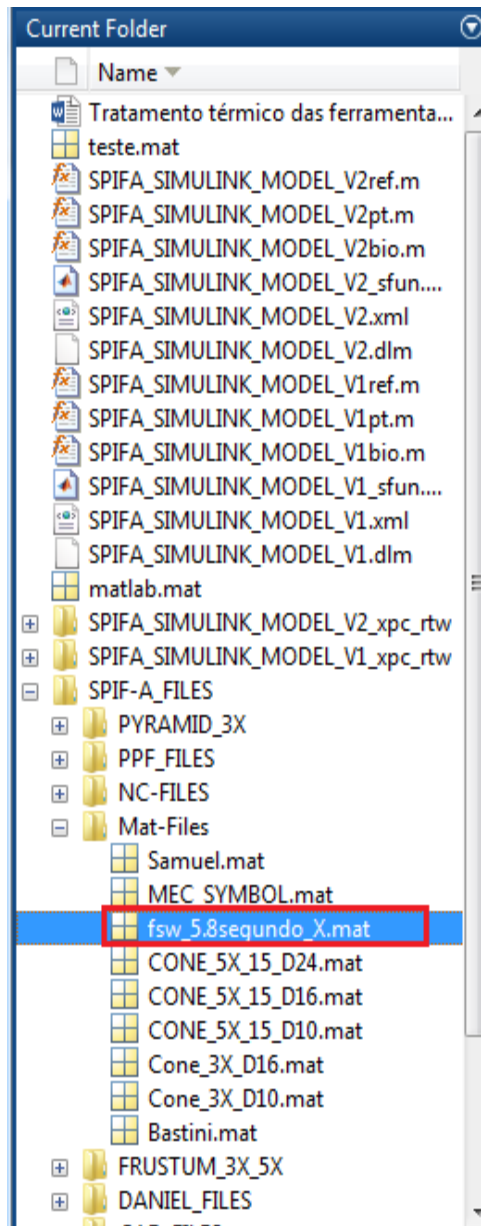
8- Nesta fase já temos todas a variáveis necessárias. Falta apenas guardá-las. Ir para a janela principal do matlab, selecionar as variáveis e guardá-las.



8.1- O ficheiro .mat deve ser guardado em Google Drive: SPIF-A_FILES: Mat-Files.
Dar o nome pretendido ao ficheiro .mat e guardar.

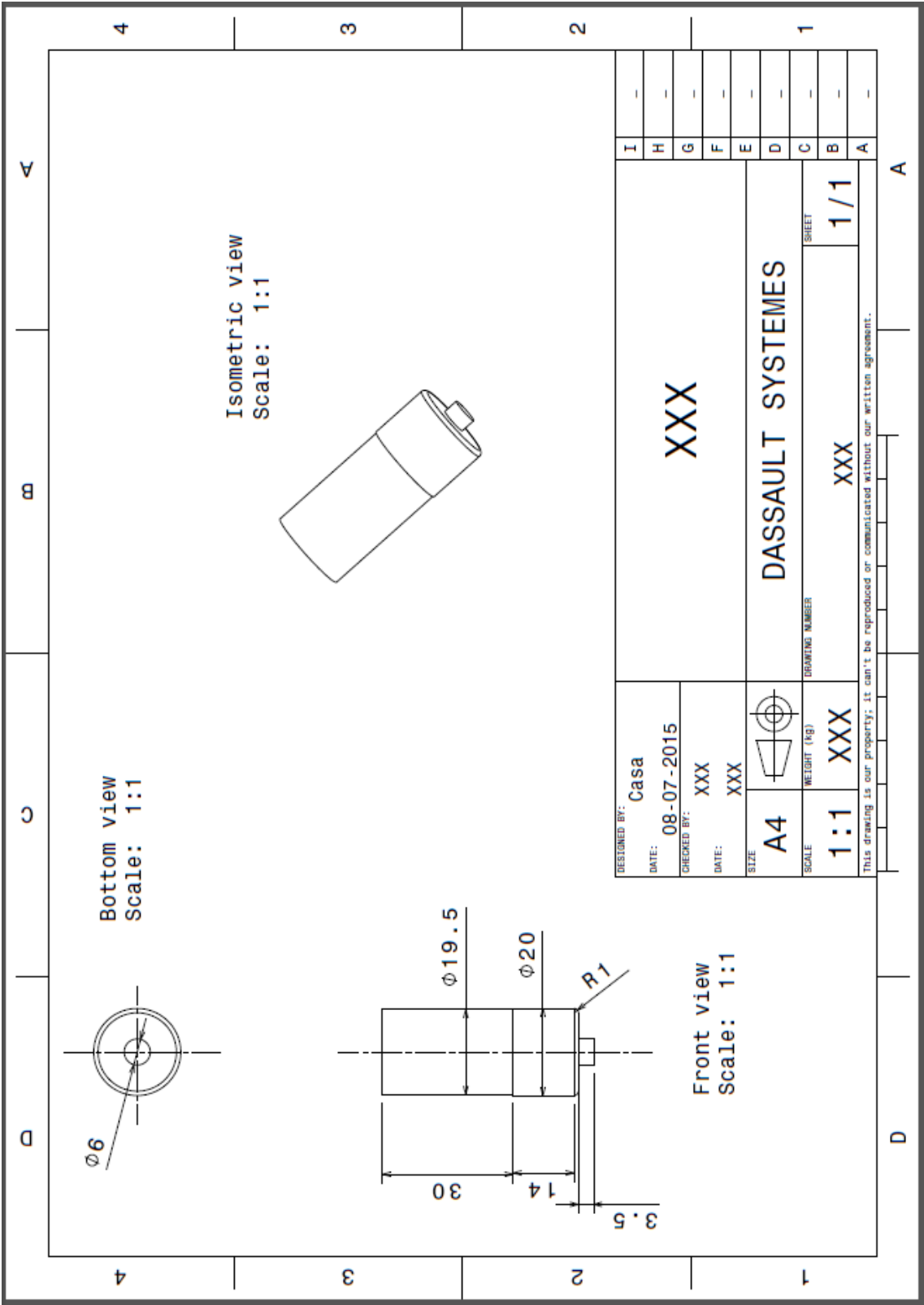


9- Após guardar o ficheiro, este já está pronto a ser utilizado pelo matlab.

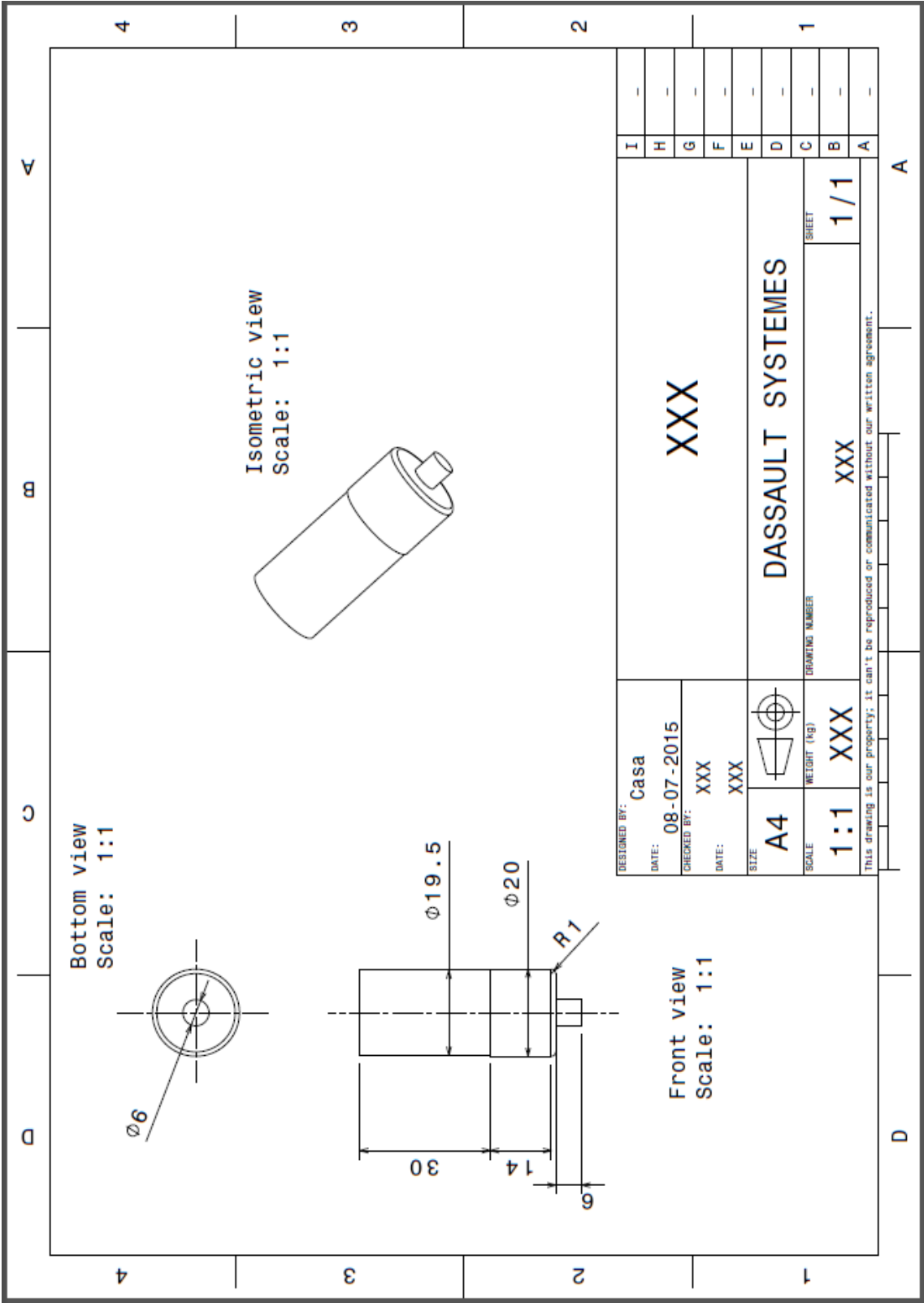


Em caso de dúvida consultar o vídeo “tutorial de criação de ficheiros.mat”.

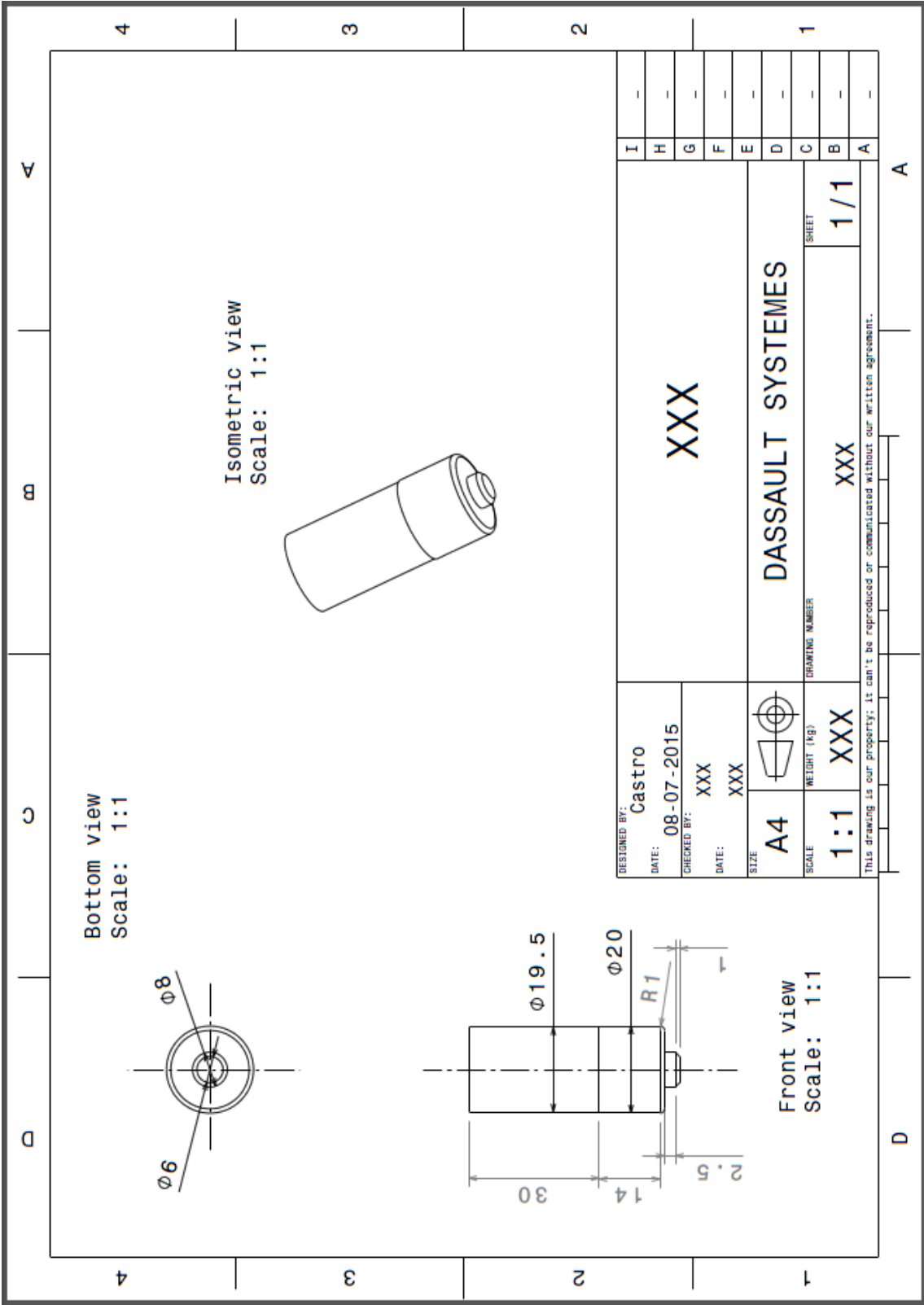
Anexo E – Desenhos técnicos das ferramentas
Desenho da ferramenta nº1



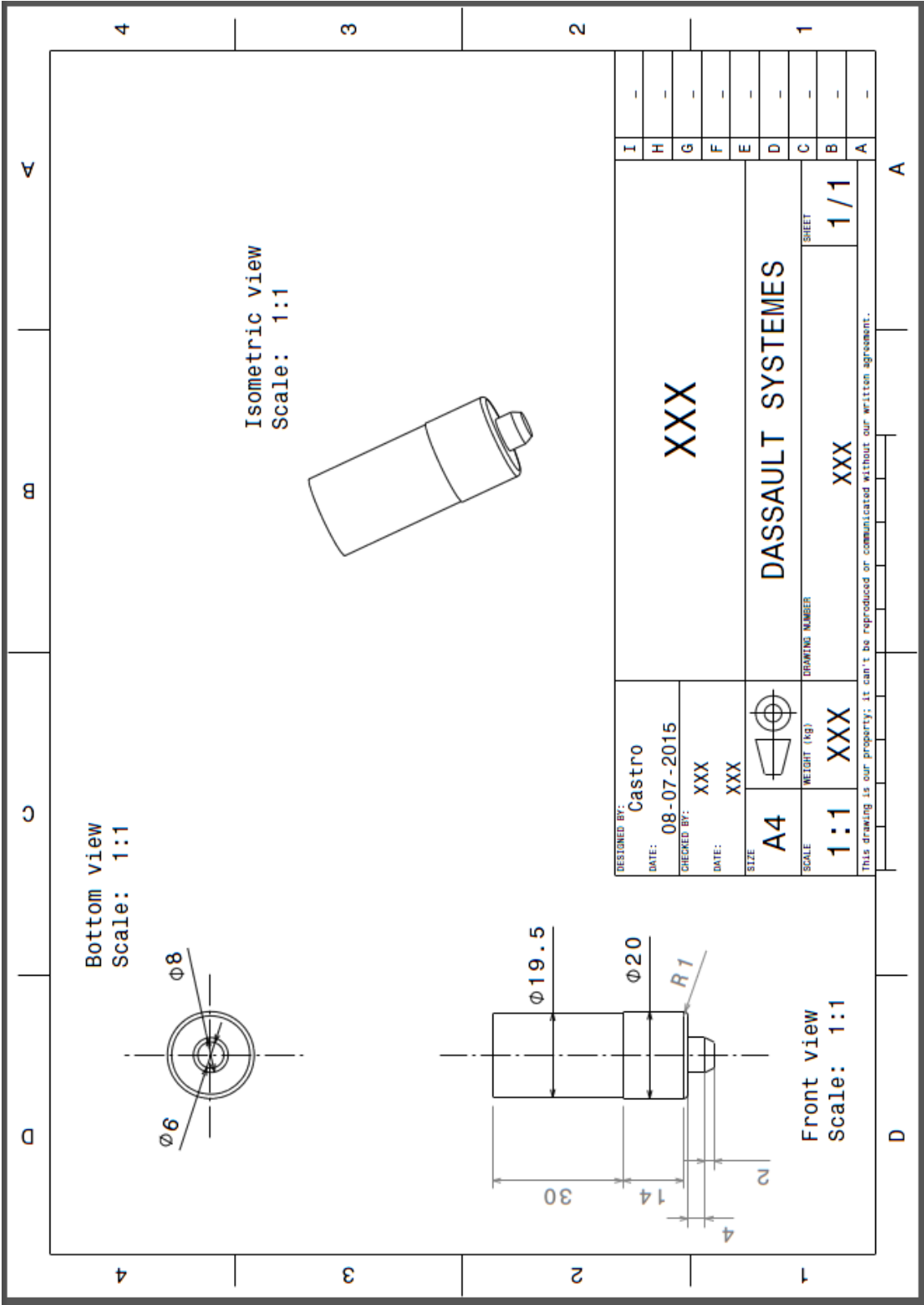
Desenho da ferramenta nº2



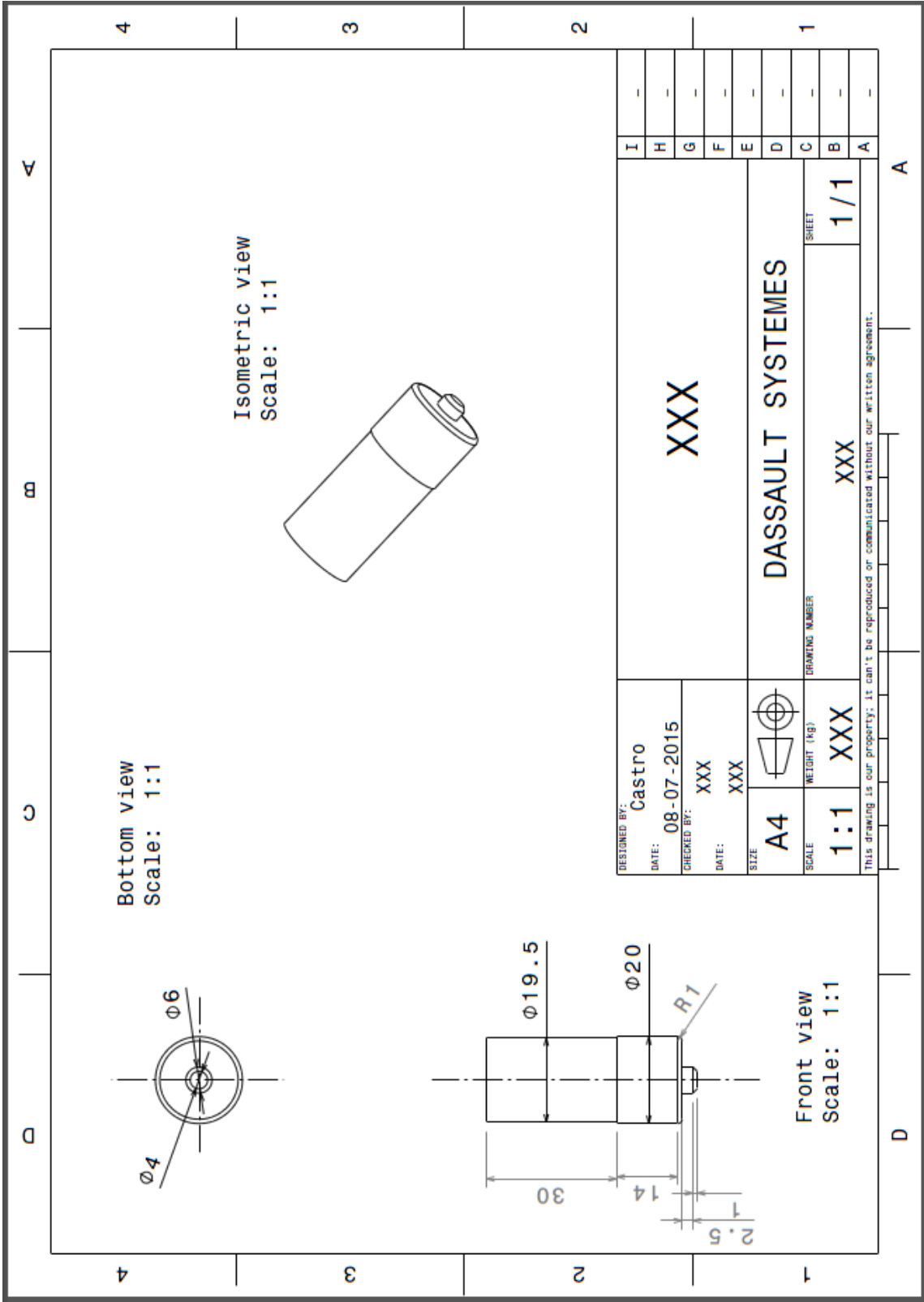
Desenho da ferramenta nº3



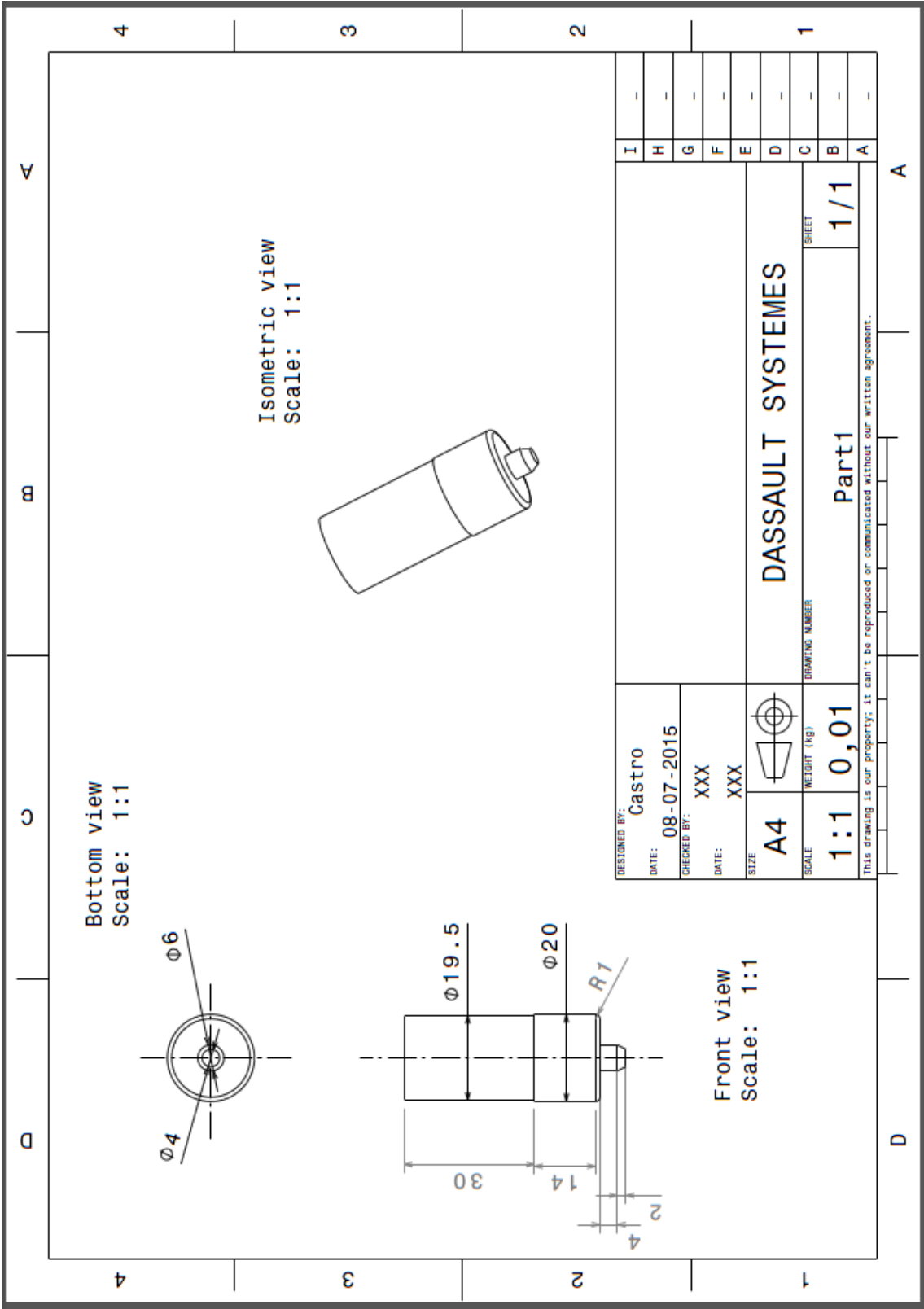
Desenho da ferramenta nº4



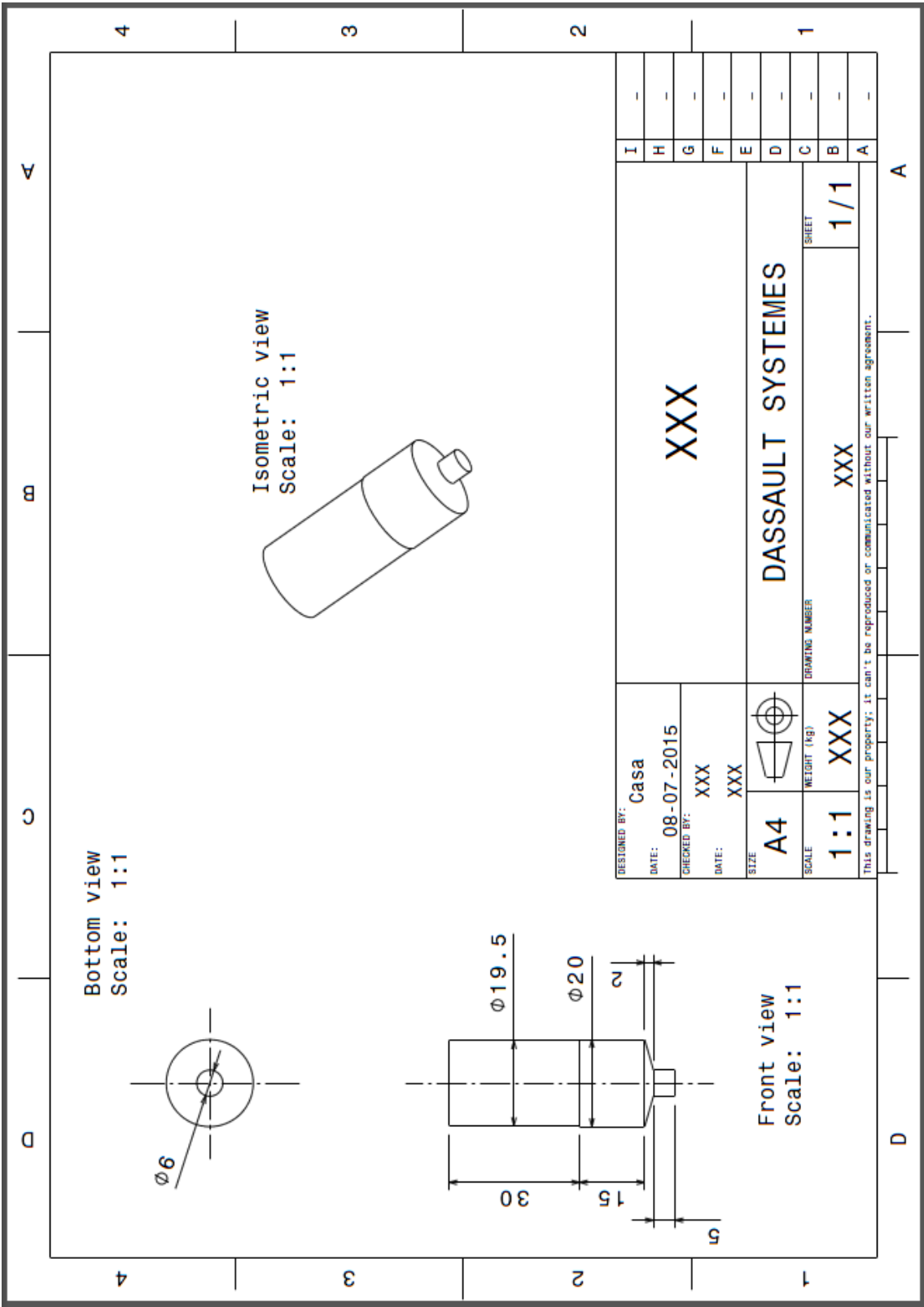
Desenho da ferramenta nº5



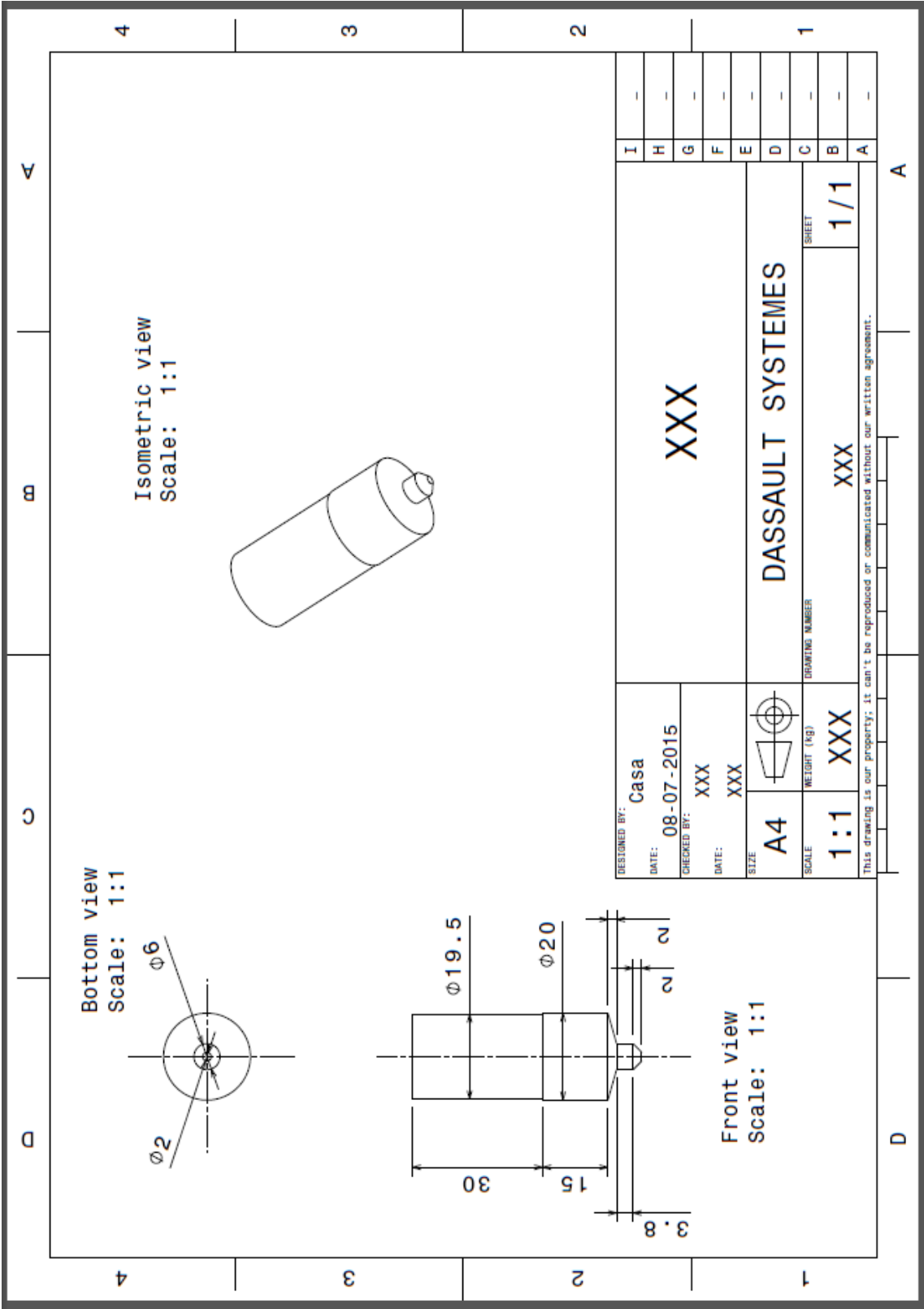
Desenho da ferramenta nº6



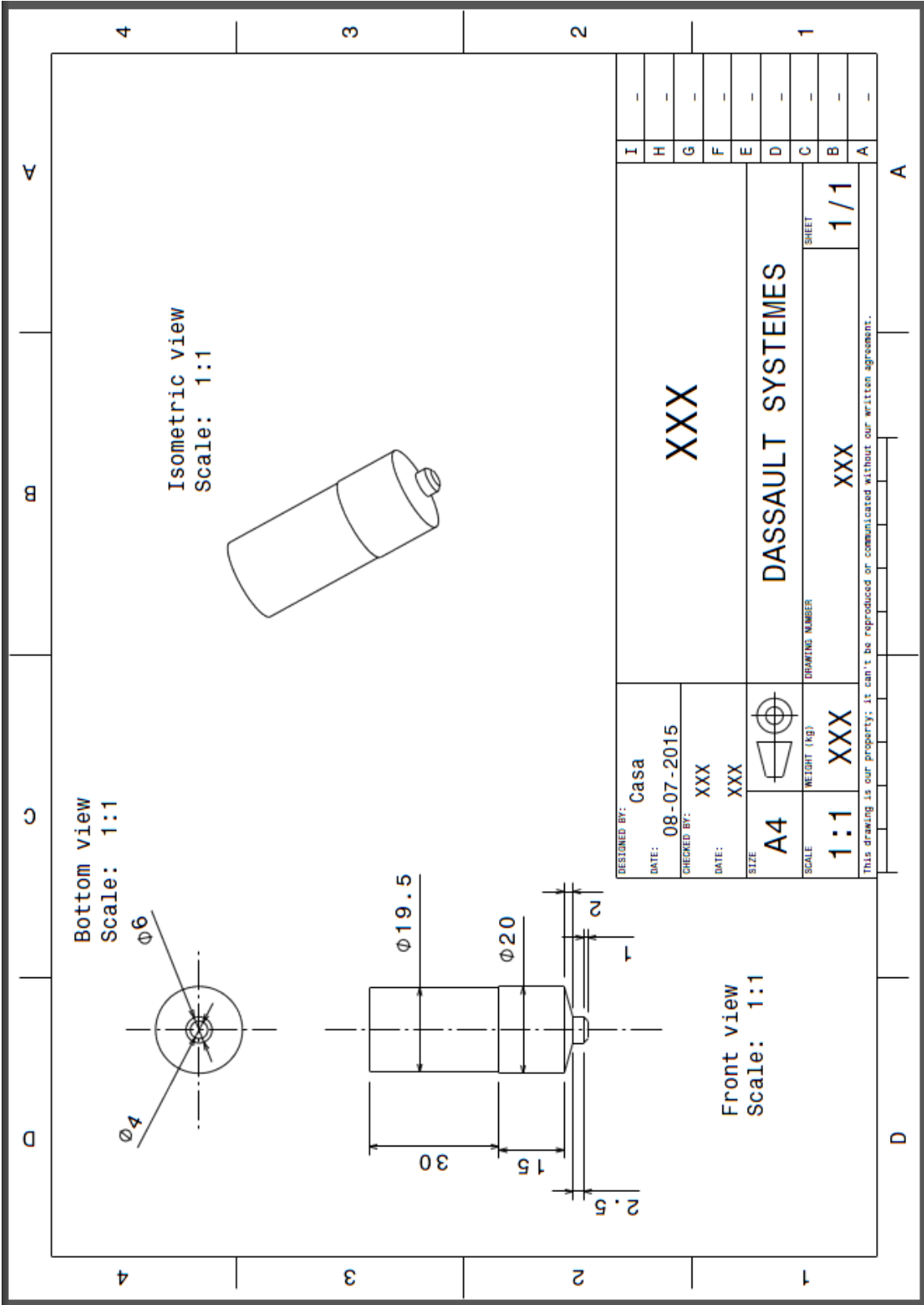
Desenho da ferramenta nº7



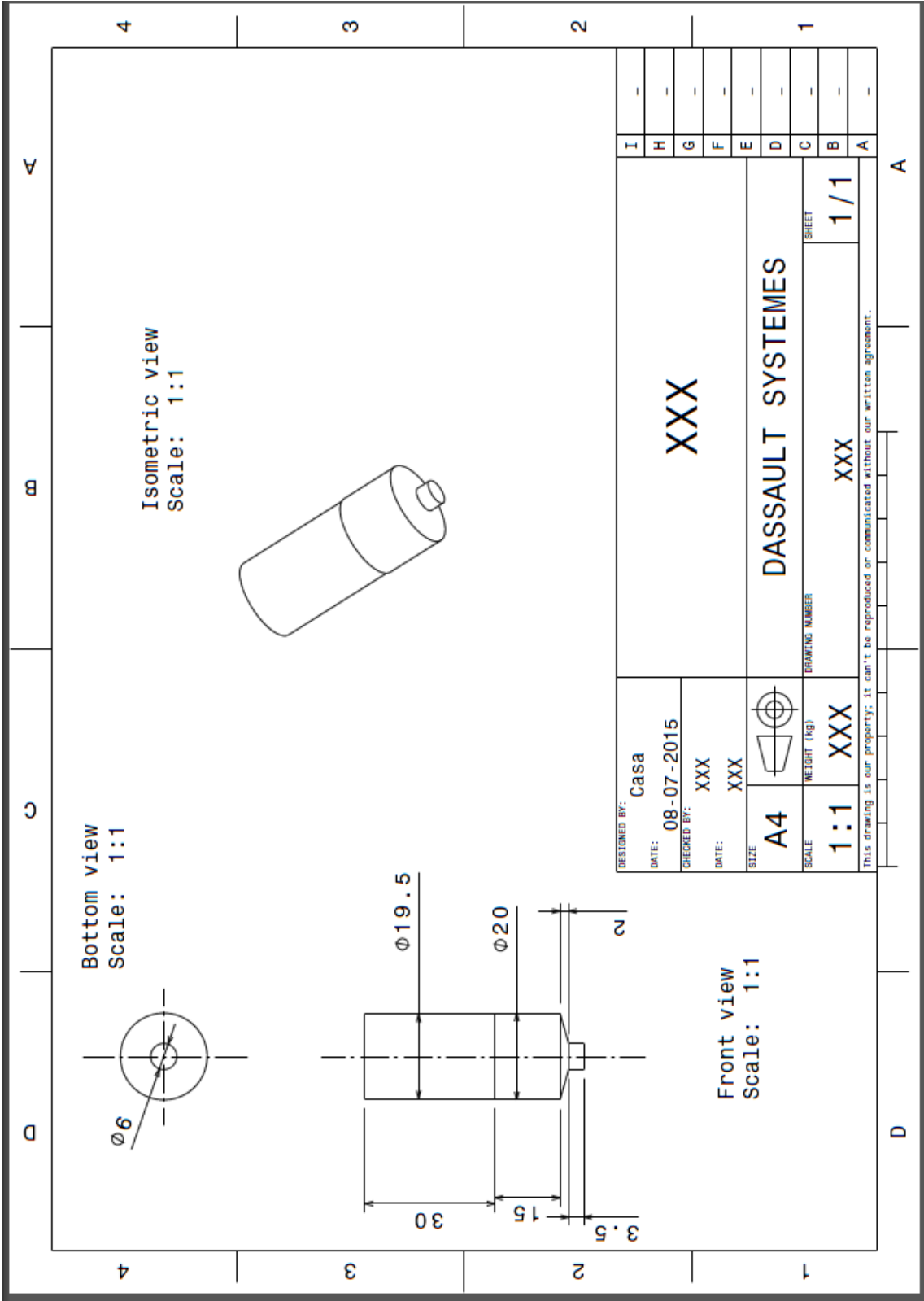
Desenho da ferramenta nº8



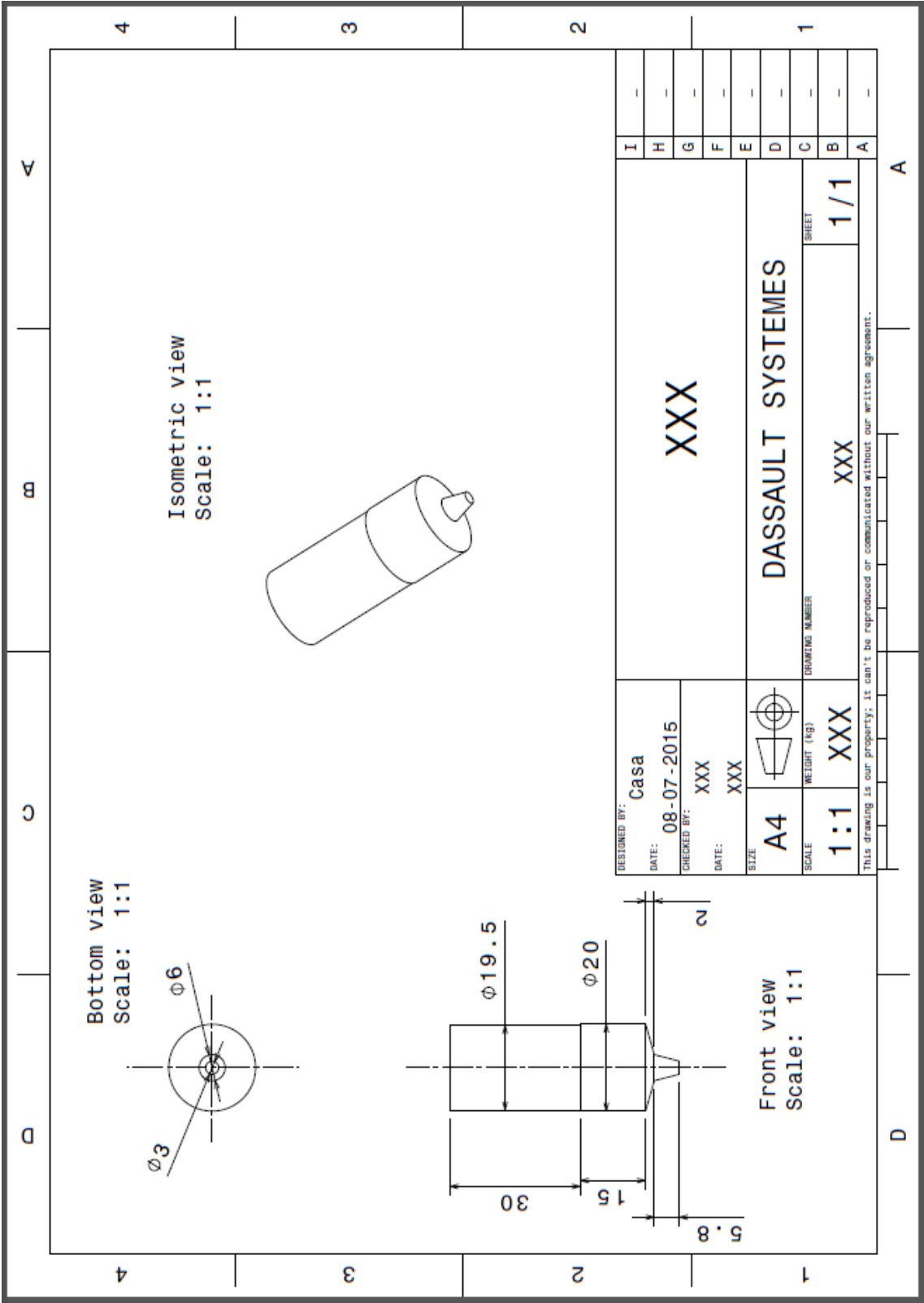
Desenho da ferramenta nº9



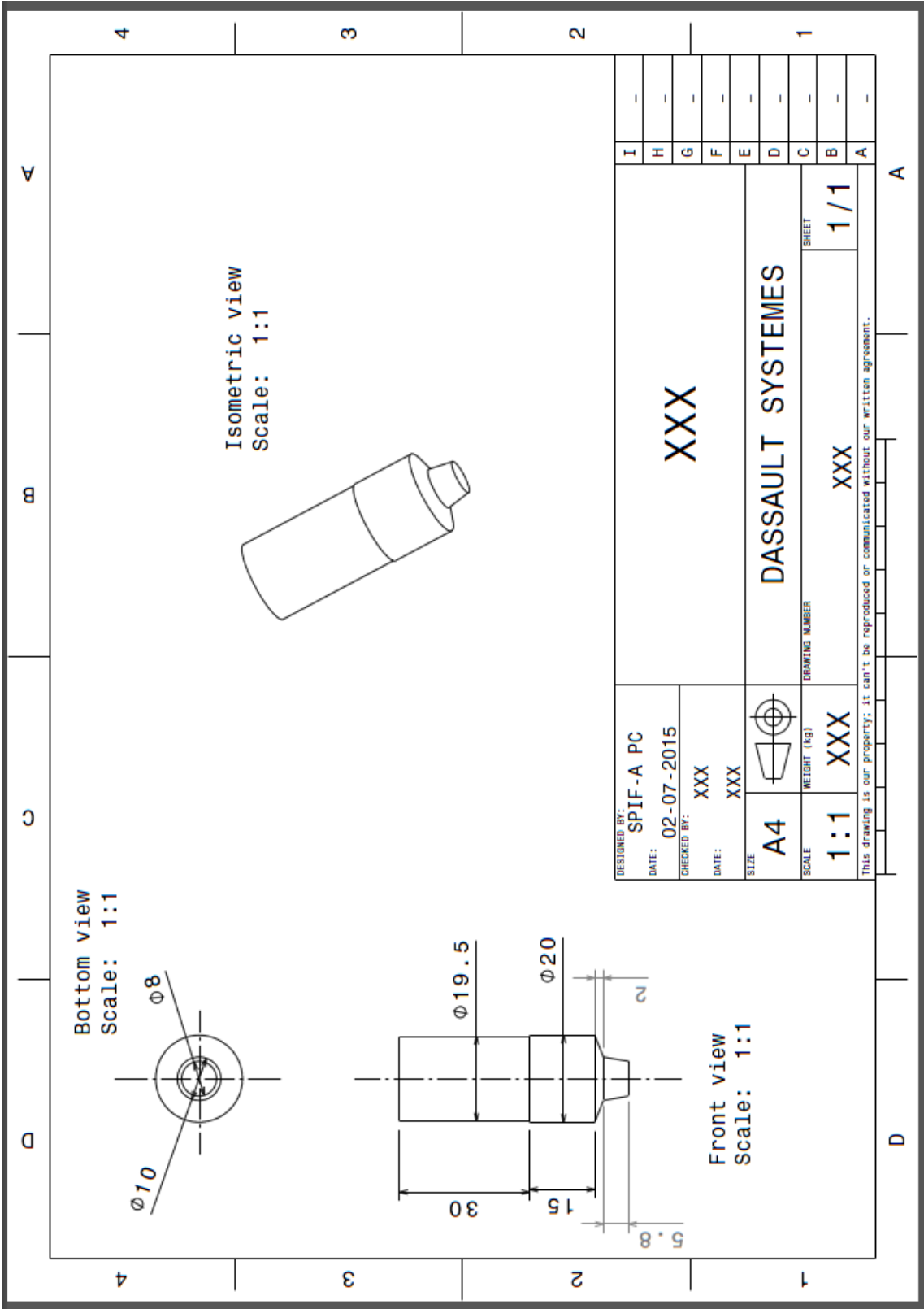
Desenho da ferramenta nº10



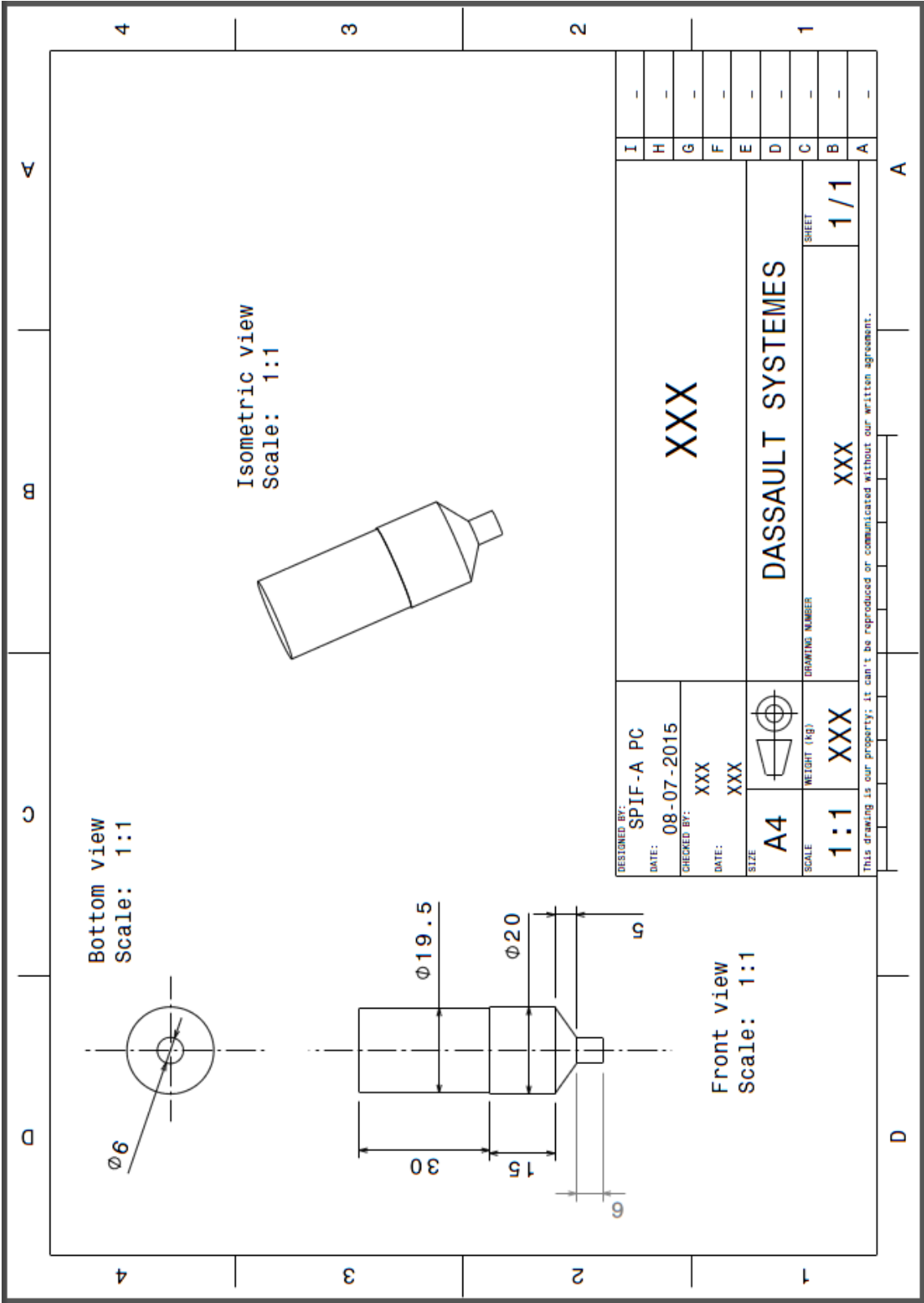
Desenho da ferramenta nº11



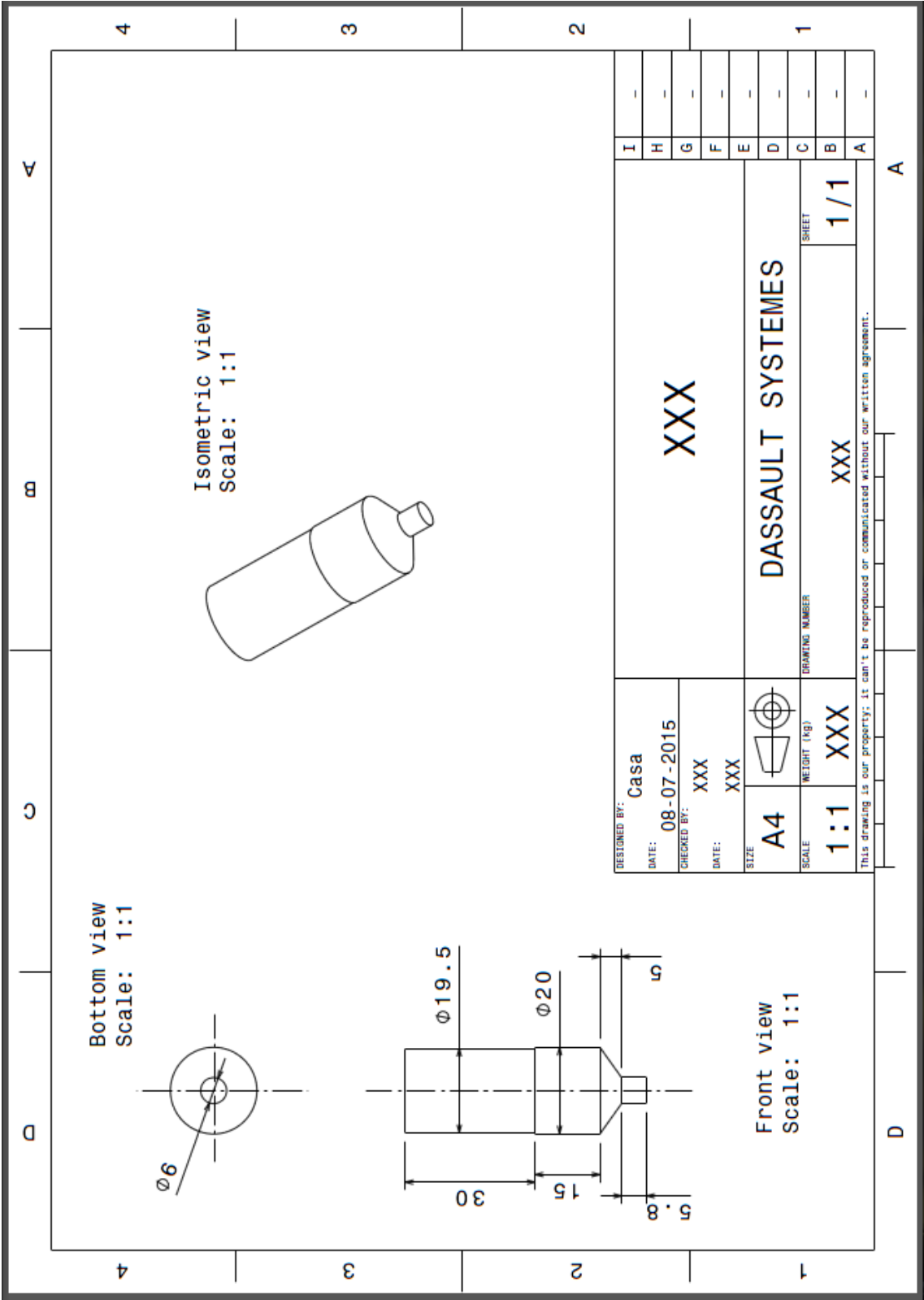
Desenho da ferramenta nº12



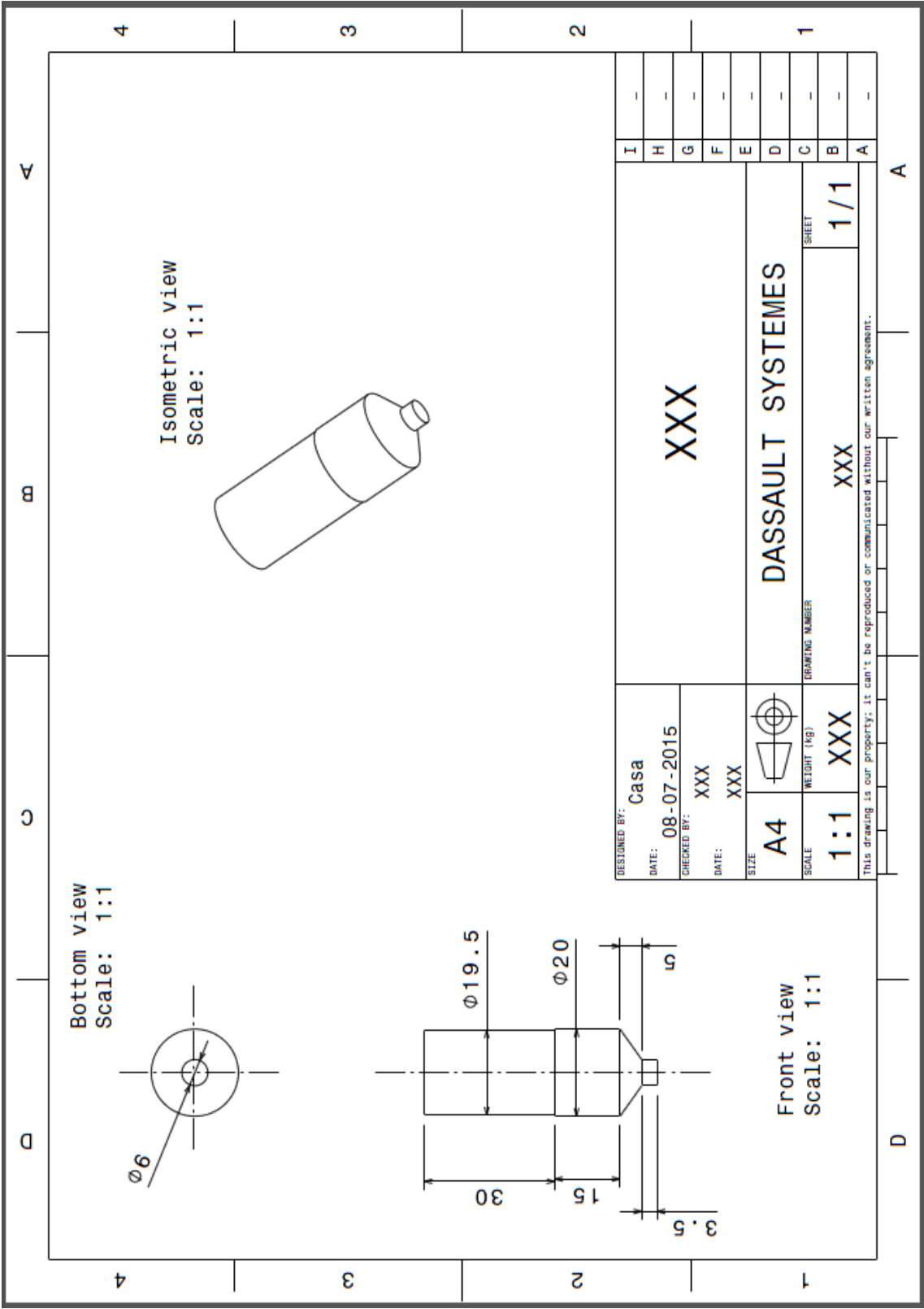
Desenho da ferramenta nº13



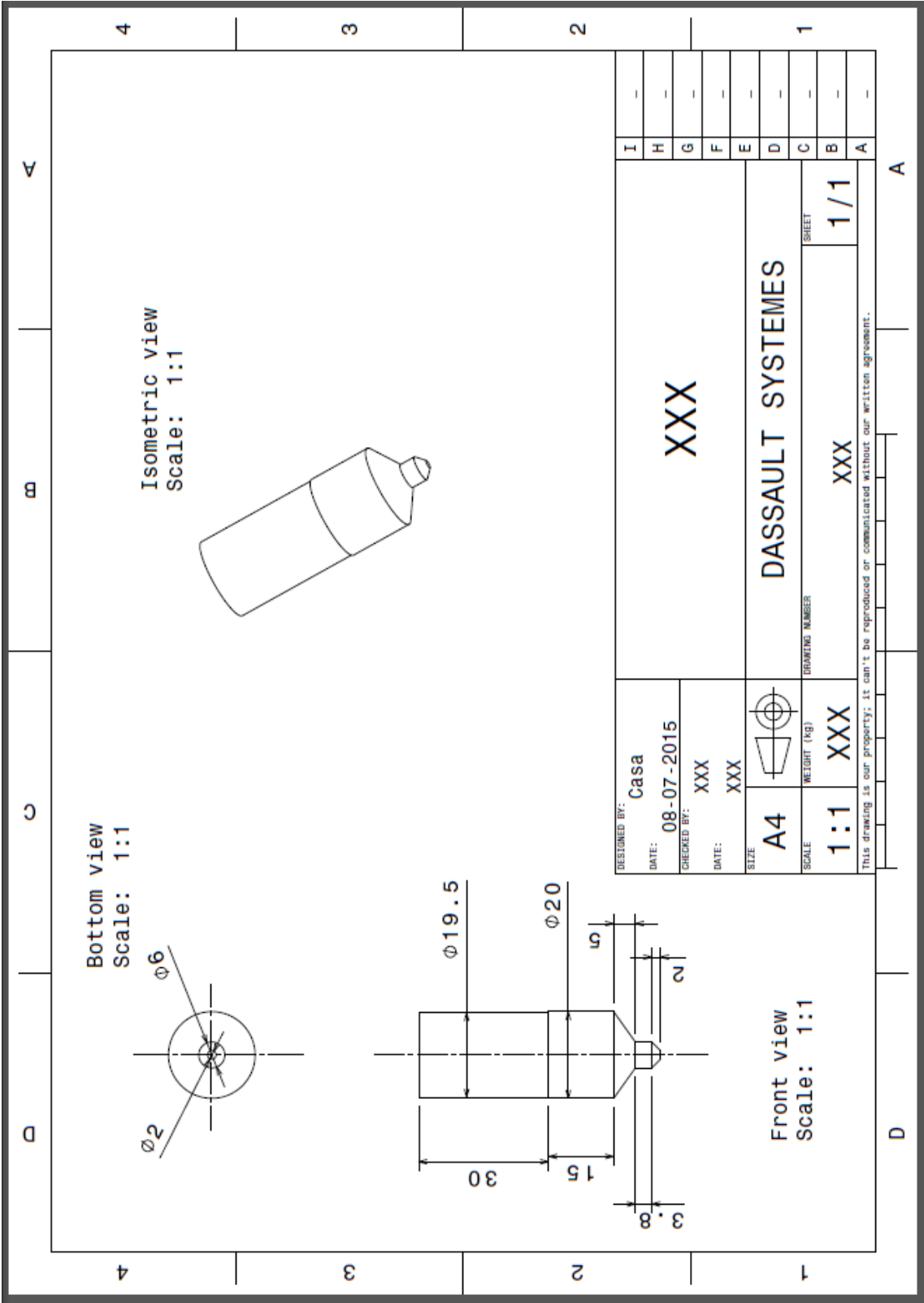
Desenho da ferramenta nº14



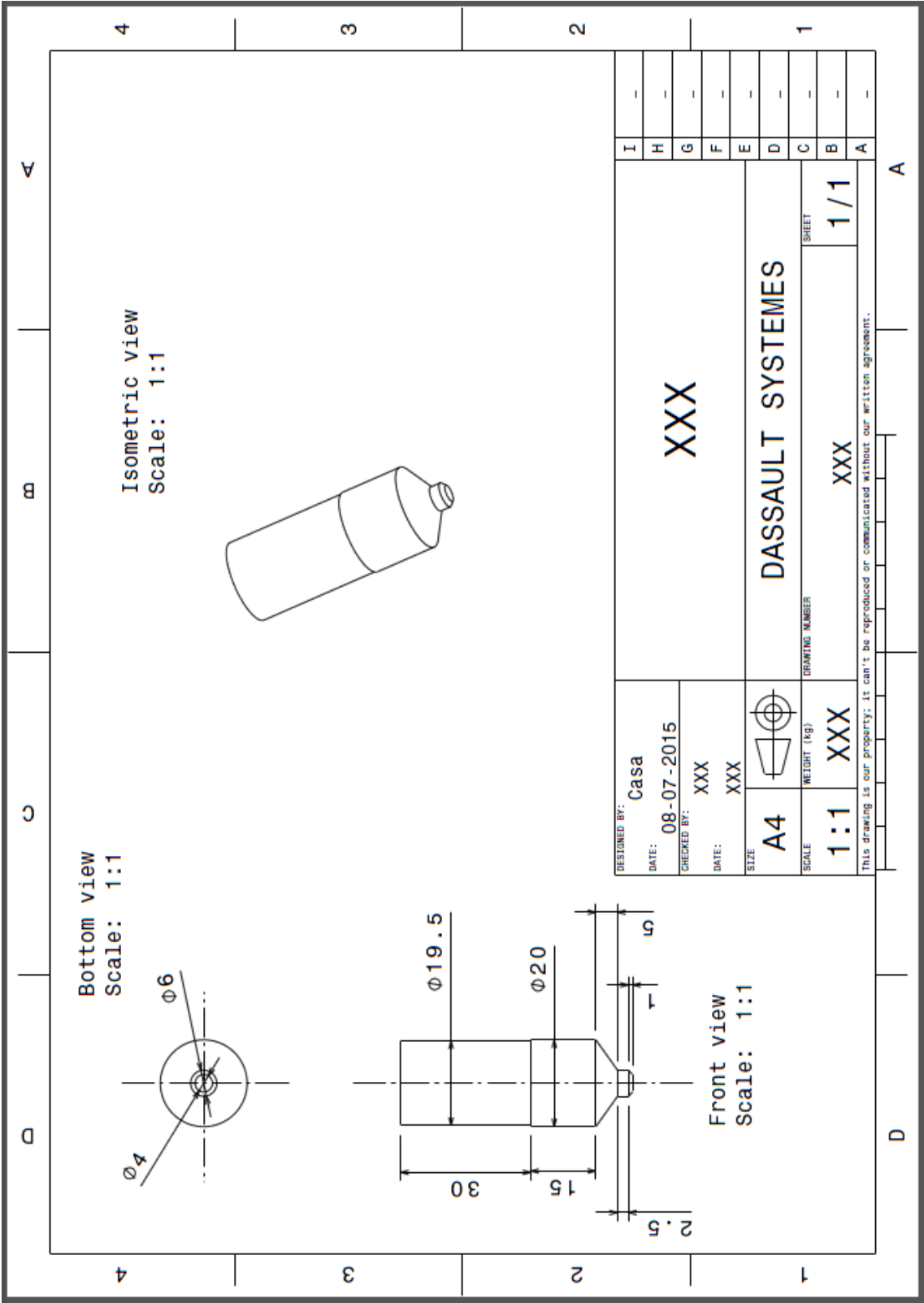
Desenho da ferramenta nº15



Desenho da ferramenta nº16

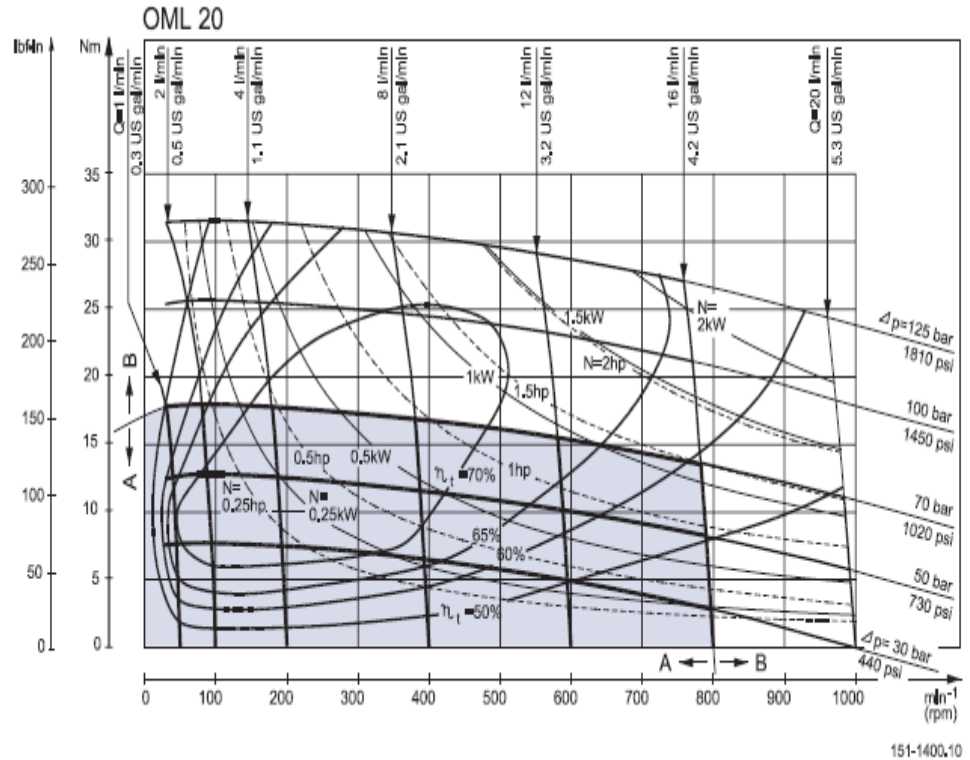


Desenho da ferramenta nº17



Anexo F – Ficha técnica do motor Danfoss de 20cm³

Function Diagrams



Technical Data for OML with 16 mm and 5/8 in Cylindrical Shaft

Type		OML	OML	OML	OML
Motor Size		8	12.5	20	32
Geometric displacement	cm ³ [in ³]	8.0 [0.49]	12.5 [0.77]	20.0 [1.22]	32.0 [1.96]
Max. speed	min ⁻¹ [rpm]	cont. 2000 [rpm]	1280 [rpm]	800 [rpm]	500 [rpm]
Max. torque	Nm [lbf·in]	cont. 7 [60]	11 [100]	18 [160]	29 [260]
		int. ¹⁾ 13 [120]	20 [180]	32 [280]	51 [450]
Max. output	kW [hp]	cont. 1.1 [1.5]	1.1 [1.5]	1.1 [1.5]	1.1 [1.5]
		int. ¹⁾ 2.0 [2.7]	2.0 [2.7]	2.0 [2.7]	2.0 [2.7]
Max. pressure drop	bar [psi]	cont. 70 [1020]	70 [1020]	70 [1020]	70 (55) ²⁾ [1020] [800] ²⁾
		int. ¹⁾ 125 [1810]	125 [1810]	125 (85) ²⁾ [1810] [800] ²⁾	125 (55) ²⁾ [1810] [800] ²⁾
		peak ²⁾ 140 [2030]	140 [2030]	125 (85) ²⁾ [2030] [1230] ²⁾	140 (55) ²⁾ [2030] [800] ²⁾
Max. oil flow	l/min [USgal/min]	cont. 16 [4.2]	16 [4.2]	16 [4.2]	16 [4.2]
		int. ¹⁾ 20 [5.3]	20 [5.3]	20 [5.3]	20 [5.3]
Max. starting pressure with unloaded shaft	bar [psi]	4 [60]	4 [60]	4 [60]	4 [60]
Min. starting torque	at max. press. drop cont. Nm [lbf·in]	5 [45]	9 [80]	15 [135]	24 [210]
	at max. press. drop int. ¹⁾ Nm [lbf·in]	10 [90]	16 [140]	27 [240]	42 [370]
Min. speed ⁶⁾	min ⁻¹ [rpm]	50	50	50	50

Anexo G – Ficha técnica do aço AISI H13

**FICHA TÉCNICA DO AÇO**

Marca: Orvar 2M

Cor: Vermelho/Amarelo/Vermelho

Designação: Aço Ligado para Trabalho a Quente

Cópia Não Controlada

1 ⇒ QUALIDADE E NORMAS EQUIVALENTES

Num. Do Material	EURONORM	AISI	DIN	AFNOR
1.2344	X40CrMoV 5-1-1	H13	X40 CrMoV 5-1	Z40CrMoV 5-1

2 ⇒ ESTADO DE FORNECIMENTO:

Recozido
Dureza: 255 HB

3 ⇒ COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Elemento Químico (%)	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
Máximo	0,43	1,20	0,50	5,50	1,50	1,10	0,030	0,030
Mínimo	0,37	0,90	0,30	4,80	1,20	0,90	-	-

4 ⇒ CERTIFICADOS AÇOS (segundo a norma EN 10204:2004)

2.1- Certificado de conformidade	☉
2.2- Relatório de ensaio	☉
3.1- Certificado de inspeção (+)	☉

(+) Em casos especiais quando previamente acordado

5 ⇒ CERTIFICADOS DE TRATAMENTO TÉRMICO

Relatório de ensaio	☉
Relatório de ensaio específico	☉
Certificado de inspeção (+)	☉

(+) Em casos especiais quando previamente acordado

Elaborado por: Paulo Duarte
D1008-0

Aprovado Por: José Oliveira

Revisão: 02


Data de emissão: 09-06-2006

Anexo H – Ficha do tratamento térmico das ferramentas

RAMADA AÇOS
SPECIAL STEEL SOLUTIONS

TRATAMENTO TÉRMICOS

Relatório de Ensaio Não Específico 2.2 NP EN10204



00561234

Folha Técnica N° 00561234

Data de Emissão 2015-07-23 13:56:04

N° da Requisição 3287

Data Entrada 2015-07-17 16:36:04

Cliente **UNIVERSIDADE DE AVEIRO**

Morada **CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE** 3810-193

Aço **H 13**

Tratamento **TÊMPERA VÁCUO**

N° Peças	Peso	Referência	Descrição
18	2.36		PEÇAS
	2.36		

	Tipo de Dureza	Dureza		Camadas	
		Min	Max	Min	Max
Valores Pedidos	HRC	52.0	54.0		
Valores Obtidos	HRC	52.0	60.0		

Derrogações N°s : 00009265

Observações:

1 PEÇA COM 52/53 Hrc. O RESTO DO MATERIAL COM 58/60 Hrc. SEGUE COM O CONHECIMENTO DO SR. ANDRES CASTRO.

VALIDADO POR:
Trat. Térmicos - Eng. Paulo Dias

D310.01/03 - Processado e impresso por computador e é válido sem assinatura

Sede - Ovar
Avenida da Rêgua, Apartado 10
3860-304 Ovar
Tel. 256 580 400
Fax 256 580 410
ramada.acos@ramada.pt
www.ramada.pt

Braga
Av. Eng.º José Roló - Lote F1,
Parque Industrial de Celentis,
4705-414 Celentis - Braga
Tel. 253 605 350
Fax 253 605 353
acos.braga@ramada.pt

Porto
Zona Industrial da Maia I, Sector VII,
Trav. Eng. Nobre da Costa, nº 75,
4475-125 Moreira da Maia
Tel. 229 430 303
Fax 229 430 304
acos.porto@ramada.pt

Agueda
Lugar do Brejo
3750-711 Recardães
Tel. 234 600 030
Fax 234 600 034
acos.agueda@ramada.pt


Marinha Grande
Estrada Pêro Neto
2430-902 Marinha Grande
Tel. 244 575 680
Fax 244 575 688
acos.m.grande@ramada.pt

Lisboa
Vila Amélia, Lote 288
2950-905 Gta. do Anjo Palmela
Tel. 212 888 900
Fax 212 888 916
acos.lisboa@ramada.pt

RAMADA INVESTIMENTOS E INDÚSTRIA

apcer ISO 9001

Net CERTIFIED MANAGEMENT SYSTEM



RAMADA AÇOS
SPECIAL STEEL SOLUTIONS

DATA	DUPLICADO	NÚMERO
23/07/2015	GUIA DE REMESSA	775769
AEN	TRAT. TÉRMICOS	Pág: 1

CLIENTE	ZONA	Nº CONTRIBUINTE	N/ ENCOMENDA
652979	115	501461108	127236
V/ ORDEM COMPRA		CONDIÇÕES DE PAGAMENTO	
3287		Recebimento a 60 dias - Geral	
ARMAZÉM			

ATDocCodeID: 2598847371

Exmos. Senhores,

UNIVERSIDADE DE AVEIRO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE
SANTIAGO
AVEIRO
3810-193 AVEIRO

NOTA: NAS ENCOMENDAS TRANSMITIDAS PELO CLIENTE, SEM CONFIRMAÇÃO DOCUMENTAL, SÓ SERÁ ACEITE RECLAMAÇÃO POR ERRO DE FORNECIMENTO, ATÉ 8 DIAS DA DATA DE RECEPÇÃO DOS MATERIAIS.

QUANTIDADE	UN	NOSSA REFERÊNCIA	DESCRIÇÃO	NB.	COMPR.	LARG.	ESPES.	PREÇO UNITÁRIO
2,360	kg	481300	T.VAC.TÊMPERA < 1100 °C FQ FT00561234*H 13°52-54 HRC REF:					6,160
ZT+h-Processado por programa certificado No 993/AT								

Nota: *) Peças fornecidas em qualidade equivalente ou superior, conforme nossa proposta (ver certificado)

LOCAL	
CARGA	DESCARGA
Nossas Instalações	Cliente
INÍCIO TRANSPORTE	
23/07/15	13:57

Volumes	
DESCRIÇÃO	QUANTIDADE

EXPEDIÇÃO	
VIA	
ROTA	
REPRESENTANTE	
Henrique Brandão	

D2210-0 Verifique as condições gerais de venda publicadas em www.ramada.pt

Sede – Ovar
Avenida da Régua, Apartado 10
3850-004 Ovar
Tel. 256 580 400
Fax 256 580 410
ramada.acos@ramada.pt
www.ramada.pt

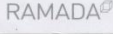
Braga
Av. Eng.º José Rolo – Lote F1,
Parque Industrial de Celeirós,
4705-414 Celeirós – Braga
Tel. 253 605 350
Fax 253 605 353
acos.braga@ramada.pt

Porto
Zona Industrial da Maia I, Sector VII,
Trav. Eng. Nóbrega da Costa, nº 75,
4475-125 Moreira da Maia
Tel. 229 430 303
Fax 229 430 304
acos.porto@ramada.pt



Águeda
Lugar do Brejo
3750-711 Ricardães
Tel. 234 600 030
Fax 234 600 034
acos.agueda@ramada.pt

Marinha Grande
Estrada Peró Neto
2430-902 Marinha Grande
Tel. 244 575 680
Fax 244 575 688
acos.m.grande@ramada.pt

Lisboa
Vila Amélia, Lote 288
2750-805 Ota, do Anjo Palmela
Tel. 212 888 910
Fax 212 888 916
acos.lisboa@ramada.pt

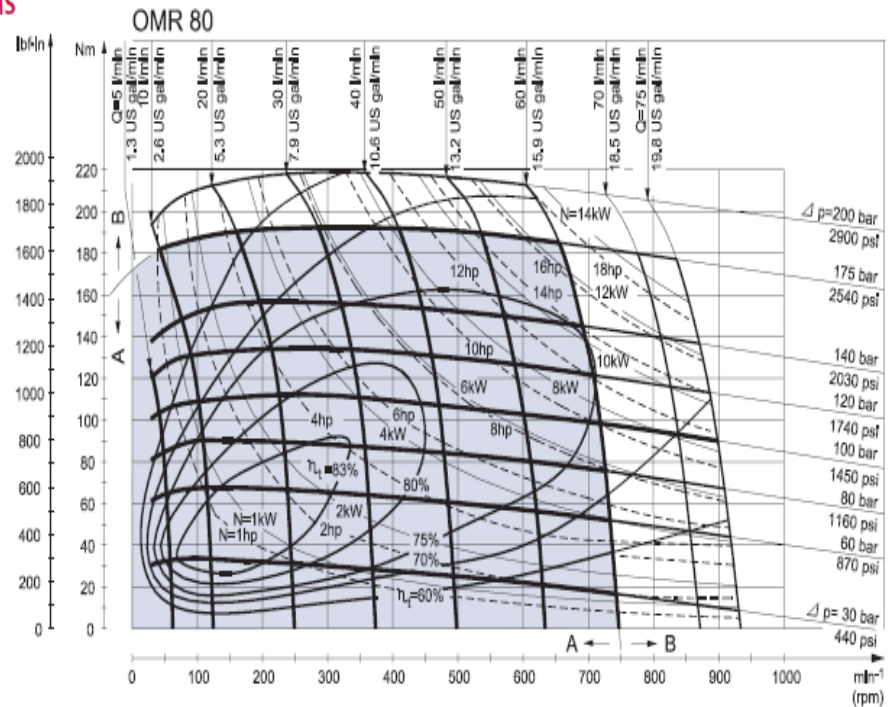


INVESTIMENTOS
E INDÚSTRIA

Anexo I - Ficha técnica do motor Danfoss de 80cm³

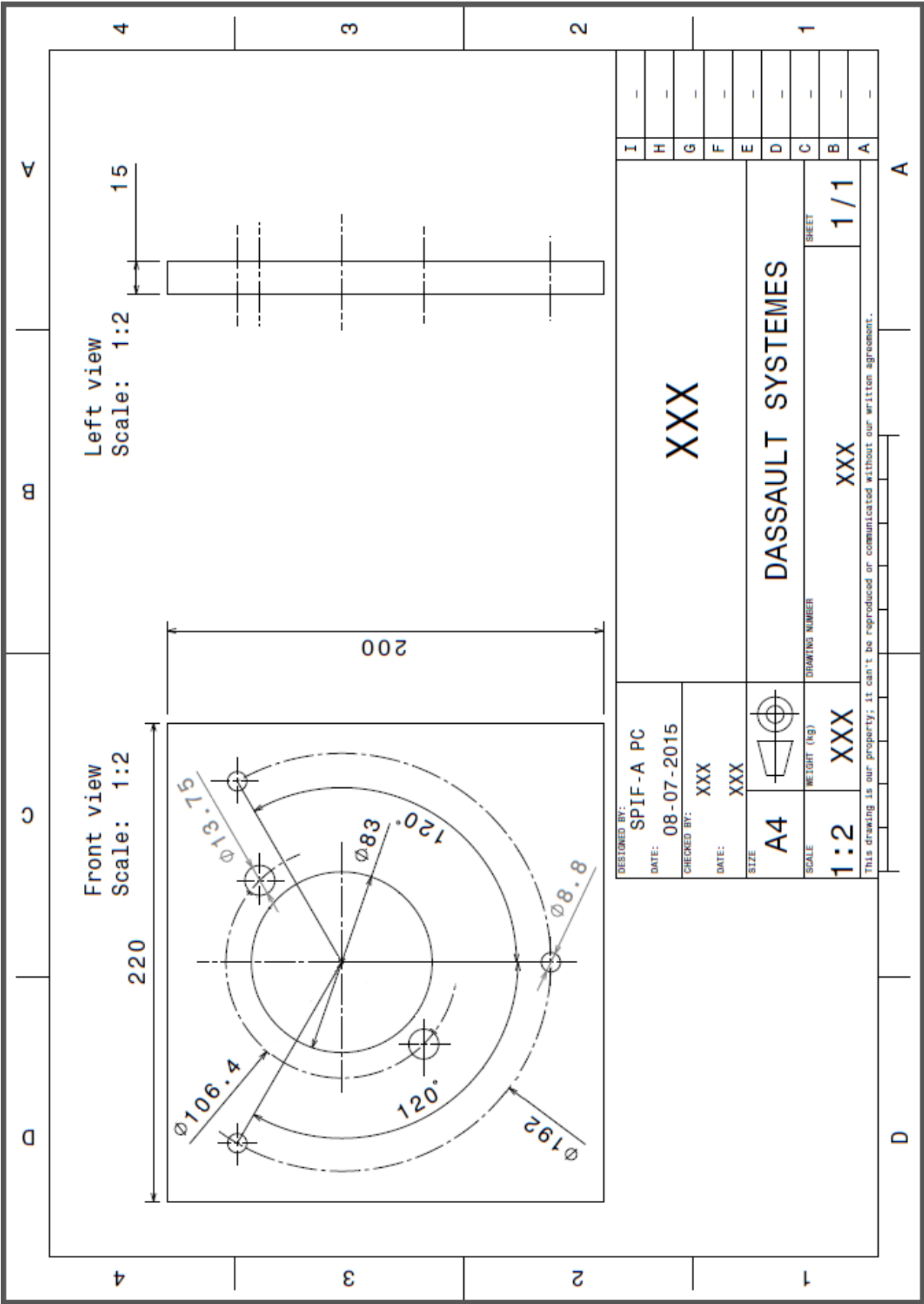
FUNCTION DIAGRAMS



TECHNICAL DATA FOR OMR WITH 25 MM AND 1 IN CYLINDRICAL SHAFT

Type		OMR	OMR	OMR	OMR	OMR	OMR	OMR	OMR
Motor size		50	80	100	125	160	200	250	315
Geometric displacement	cm ³ (in ³)	51.6 (3.16)	80.3 (4.91)	99.8 (6.11)	125.7 (7.69)	159.6 (9.77)	199.8 (12.23)	249.3 (15.26)	315.7 (19.32)
Max. speed	min ⁻¹ (rpm)	cont. int. ¹⁾	775 970	750 940	600 750	475 600	375 470	300 375	240 300
Max. torque	Nm (lbf-in)	cont. int. ¹⁾ peak ²⁾	100 130 170	195 220 270	240 280 320	300 340 370	300 390 460	300 390 560	300 420 600
Max. output	kW (hp)	cont. int. ¹⁾	7.0 8.5	12.5 15.0	13.0 15.0	12.5 14.5	10.0 12.5	8.0 10.0	6.0 8.0
Max. pressure drop	bar (psi)	cont. int. ¹⁾ peak ²⁾	140 175 225	175 200 225	175 200 225	175 200 225	130 175 225	110 140 200	80 110 150
Max. oil flow	l/min (US gal/min)	cont. int. ¹⁾	40 50	60 75	60 75	60 75	60 75	60 75	60 75
Max. starting pressure with unloaded shaft	bar (psi)		10 (145)	10 (145)	10 (145)	9 (130)	7 (100)	5 (75)	5 (75)
Min. starting torque	at max. press. drop cont. at max. press. drop int. ¹⁾		80 100	150 170	200 230	250 280	240 320	260 330	240 310
Min. speed ³⁾	min ⁻¹ (rpm)		10	10	10	9	7	5	5

Anexo J - Desenho do apoio do motor



Anexo K - Desenho do provete para tração

